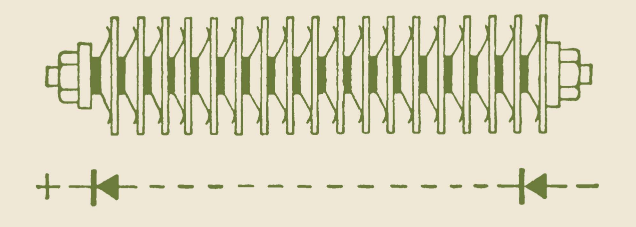


В. Ю. РОГИНСКИЙ

ПОЛУПРОВОДНИКОВЫЕ ВЫПРЯМИТЕЛИ





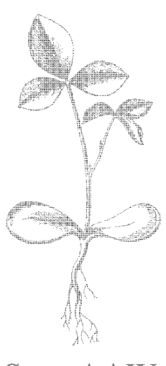
ГОСЭНЕРГОИЗДАТ

МАССОВАЯ РАДИО БИБЛИОТЕКА
ПОД ОБЩЕЙ РЕДАКЦИЕЙ АКАДЕМИКА А. И. БЕРГА

Выпуск 160

В. Ю. РОГИНСКИЙ

ПОЛУПРОВОДНИКОВЫЕ ВЫПРЯМИТЕЛИ







ГОСУДАРСТВЕННОЕ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЕ ИЗДАТЕЛЬСТВО
МОСКВА 1952 ЛЕНИНГРАД

52344

В брошюре описываются твердые выпрямители (купроксные и селеновые) и их применение в различных схемах. Приводятся типовые расчеты выпрямителей для радиоприемников и передатчиков, необходимые графики и справочные материалы.

Брошюра предназначена для подготовленных радиолюбителей.

Редактор *М. И. Игнацын* Техн. редактор *А. М. Фридкин* и *И. М. Скворцов*

Сдано в набор 27/II 1952 г. Подписано к печати 13/XI 1952 г.
Бумага 84×108 1/32 1 1/8 бумажн. листа, 3,69 п. л. Уч.-изд. л. 4,0
Т-08019 Тираж 15 000 экз. Заказ № 3097
Цена 1 р. 60 к. (номинал по прейскуранту 1952 г.)

Типография Госэнергоиздата. Москва, Шлюзовая наб., 10.

ВВЕДЕНИЕ

Большинство современных электростанций вырабатывает электрическую энергию переменного тока. Широкое распространение энергетических систем переменного тока объясняется большими их преимуществами по сравнению с системами постоянного тока. Наиболее важным преимуществом переменного тока является возможность трансформации одного напряжения в другое, более высокое или низкое, что широко используется при передаче электрической энергии высокого напряжения при больших расстояниях от электростанции до места потребления с целью уменьшения потерь в линиях передачи.

Под переменным током обычно понимают ток, изменение которого по величине и направлению повторяется периодически через равные промежутки времени (T). Частотой переменного тока (f) называют число полных периодических изменений тока в 1 сек. Единицей частоты является герц (*гц*), равный одному периоду в секунду:

$$f = \frac{1}{T}\ гц.$$

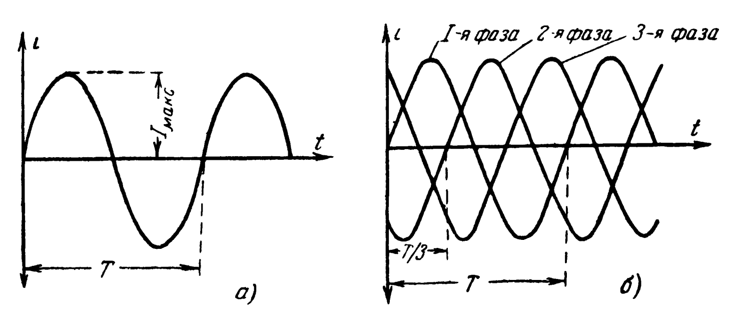
Во всех сетях переменного тока СССР изменение значения тока i во времени t происходит по синусоидальному закону (фиг. 1) с частотой 50 *гц*.

Сети переменного тока, которые обычно используются в быту для распределения электрической энергии, рассчитаны на напряжения 127 или 220 *в*.

Использование переменного тока для питания радиоустройств представляет большое удобство. Переменный ток может быть непосредственно использован для питания цепей накала ламп с подогревными катодами, а также и мощных ламп прямого накала без заметного «фона» на выхо-

де радиоустройств [1]. Однако для питания анодных и сеточных цепей электронных ламп необходим постоянный ток.

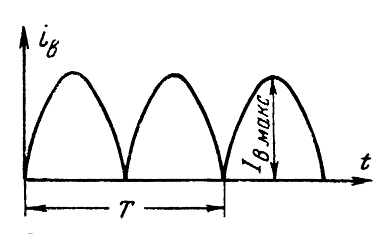
Преобразование переменного тока в постоянный осуществляется в специальных устройствах — выпрямителях, которые пропускают ток только одного направления. При этом получается пульсирующий ток, т. е. такой ток,



Фиг. 1. График переменного тока.
а — однофазный ток; *б* — трехфазный ток.

который сохраняет постоянство направления, но изменяет свою величину во времени. На фиг. 2 приведен график пульсирующего тока, получаемого в часто встречающейся схеме так называемого двухтактного выпрямления.

Пульсирующий выпрямленный ток можно представить в виде суммы—постоянной составляющей и переменных составляющих (гармоник), частота которых кратна частоте переменного тока сети. В частности, наибольшее значение (амплитуда) пульсирующего тока $I_{в.макс}$ (фиг. 2) является суммой:



Фиг. 2. График выпрямленного пульсирующего тока.

а) постоянной составляющей $I_0 = 0{,}636\ I_{в.макс}$;

б) переменной составляющей двойной частоты (по отношению к частоте тока сети), равной $0{,}424\ I_{в.макс}$;

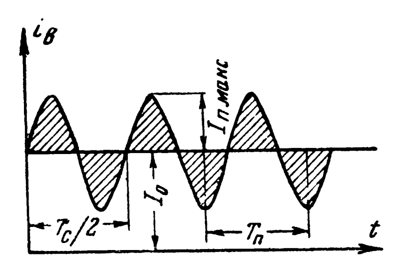
в) переменной составляющей четырехкратной частоты, равной $0{,}085\ I_{в.макс}$;

---

[1] „Фоном“ переменного тока называют помехи, возникающие в приемнике в виде непрерывного тона.

г) переменной составляющей шестикратной частоты, равной 0,038 $I_{в.макс}$.

Как видно, амплитуды переменных составляющих убывают с ростом частоты. Если пренебречь малыми токами более высоких частот, то пульсирующий ток можно представить графиком фиг. 3, из которого видно, что частота пульсации равна двойной частоте тока в сети.



Фиг. 3. Постоянная и переменная составляющие выпрямленного тока.

T_c — период изменения тока в сети; $T_п$ — период пульсации тока.

Питать таким током цепи приемника или усилителя нельзя, так как анодный ток лампы будет резко изменяться по величине с частотой пульсации выпрямленного напряжения.

Величина пульсации выпрямленного напряжения обычно характеризуется коэффициентом пульсации $k_п$, под которым понимают выраженное в процентах отношение амплитуды переменной составляющей выпрямленного напряжения $U_{п.макс}$ к постоянной составляющей U_0:

$$k_п = \frac{U_{п.макс}}{U_0} \cdot 100\,\%.$$

Если сопротивление нагрузки имеет чисто активный характер, то коэффициент пульсации может быть также выражен по току:

$$k_п = \frac{I_{п.макс}}{I_0} \cdot 100\,\%,$$

так как в данном случае имеют место соотношения: $U_0 = I_0 \cdot R_н$ и $U_{п.макс} = I_{п.макс} \cdot R_н$, где $R_н$ — сопротивление нагрузки.

Допустимые значения коэффициента пульсации для различных видов нагрузки приведены в табл. 1.

Если коэффициент пульсации выпрямителя превышает допустимое значение, то необходимо принять меры для его уменьшения. Для этой цели на выходе выпрямителя в цепь включается дополнительное звено — сглаживающий фильтр.

Разнообразные выпрямительные установки обычно различаются по схеме выпрямления и по типу применяемых выпрямительных элементов.

Таблица 1

Потребители электрической энергии постоянного тока и их характеристика

Потребители энергии	Электрические характеристики		
	Напряжение, *в*	Ток, *а*	Допустимый коэффициент пульсации k_n напряжения или тока, %
Радиоприемники с полным питанием от сети переменного тока:			
а) анодные цепи выходных ламп усилителя низкой частоты	240÷450	0,04÷0,1	Меньше 0,5
б) анодные цепи ламп предварительного усиления, усилителей высокой частоты, преобразователей частоты и т. п.	200÷300	0,01÷0,02	Меньше 0,1
в) обмотки возбуждения электродинамического громкоговорителя	60÷240	0,015÷0,04	Меньше 20
г) нити накала маломощных ламп с непосредственным накалом	2÷6,3	До 5	Меньше 0,5
Ламповый генератор малой мощности (лампы усилителя высокой частоты):			
а) анодные цепи генератора	До 450	До 0,1	Меньше 0,5
б) нити накала ламп . . .	2÷20	До 2	Меньше 0,1
Усилитель высокой частоты коротковолнового передатчика 10÷25 *вт* (лампы с непосредственным накалом):			
а) анодные цепи	До 750	До 0,1	Меньше 0,1
б) нити накала ламп . . .	4÷20	До 5	Меньше 0,5
Двигатель постоянного тока малой мощности	120÷240	До 0,5	Меньше 5

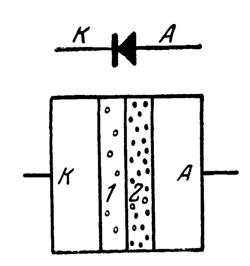
В этой брошюре мы рассмотрим только полупроводниковые выпрямители, действие которых основано на выпрямляющих свойствах контакта полупроводника с металлом. Из таких выпрямителей наиболее распространены селеновые и меднозакисные (купроксные). Они обладают рядом существенных преимуществ: отсутствием накальных цепей и вакуумных колб, возможностью выпрямлять малые напряжения, относительно малыми размерами, большим к. п. д., возможностью работы выпрямителей при большом диапазоне температур окружающей среды.

ПРИНЦИП ДЕЙСТВИЯ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ ВЫПРЯМИТЕЛЕЙ

Полупроводниковый выпрямитель представляет собой слой полупроводника, заключенный между двумя металлическими электродами.

В настоящее время наиболее широко используются селеновые и меднозакисные (купроксные) выпрямители. Наряду с этим находят также применение выпрямители с иными полупроводниковыми материалами (кремниевые, германиевые, выпрямители с двуокисью титана и др.).

Схематический разрез полупроводникового выпрямительного элемента показан на фиг. 4. Здесь электрод *A* служит анодом, а электрод *K* — катодом элемента. Между электродами расположен слой полупроводника. Выпрямляющее действие подобной системы состоит в том, что ее электрическое сопротивление резко изменяется в зависимости от направления тока. Сопротивление ничтожно мало для электрического тока в направлении от анода к катоду, т. е. когда к аноду приложен «плюс», а к катоду «минус» подводимого напряжения. Ток в направлении от анода к катоду принято называть прямым током $I_{пр}$, а приложенное при этом к выпрямительному элементу напряжение — прямым напряжением $U_{пр}$. Иногда $I_{пр}$ также называют током выпрямителя в направлении пропускания.



Фиг. 4. Схематическое устройство полупроводникового выпрямительного элемента.

K — катод; *A* — анод; *1* — запорный слой; *2* — полупроводниковый слой.

Сопротивление выпрямительного элемента резко возрастает для тока противоположного направления — от катода к аноду, который принято называть обратным током $I_{обр}$. Обратный ток создается под воздействием обратного напряжения $U_{обр}$, т. е. когда «плюс» приложен к катоду, а «минус» — к аноду выпрямительного элемента. Наличие обратного тока является характерной особенностью полупроводниковых выпрямителей и резко отличает их от «идеальных» выпрямителей.

Чтобы понять механизм действия полупроводниковых выпрямителей, необходимо, хотя бы вкратце, познакомиться с основными электрическими свойствами твердых тел.

Все многообразие твердых тел можно по их способности проводить электрический ток разделить на проводники, полупроводники и изоляторы (диэлектрики). Проводники электрического тока характеризуются весьма малым сопротивлением. К ним относятся главным образом металлы. Их удельное сопротивление равно $10^{-4} \div 10^{-5}$ *ом · см* и возрастает с повышением температуры проводника. Изоляторы (диэлектрики) в нормальных условиях практически не проводят электрический ток. Их удельное сопротивление оценивается в $10^{10} \div 10^{18}$ *ом см*. Полупроводники (электронные) занимают по своим электрическим свойствам промежуточное положение между проводниками и изоляторами. Их удельное сопротивление колеблется в широких пределах: от 10 до 10^{10} *ом · см* и уменьшается с ростом температуры полупроводника.

Известно, что все вещества состоят из атомов. Атомы каждого химического элемента состоят из положительно заряженного ядра, окруженного отрицательно заряженными частицами — электронами. Электроны движутся вокруг ядра по замкнутым кривым (орбитам). Все электроны одинаковы, и каждый из них имеет заряд $e = 1{,}6 \cdot 10^{-19}$ *к*. Свойства атома определяются зарядом его ядра, который всегда составляет целое кратное число относительно заряда электрона. Таким образом, электрический заряд ядра $Q = eZ$, где Z — целое число, называемое атомным номером данного элемента. В нормальном состоянии атом электрически нейтрален, так что общее число электронов в атоме равно атомному номеру. Как правило, атомный номер возрастает с увеличением атомного веса элемента.

Электроны в атоме движутся по замкнутым кривым (орбитам), находящимся на различных расстояниях от ядра. Поэтому говорят, что электронная оболочка атома построена из отдельных слоев. Электроны внутренних ближайших к ядру слоев прочно связаны с ним силами электростатического притяжения. Электроны наиболее удаленных от ядра слоев связаны с ним слабее. Эти «внешние» электроны определяют химические свойства атома.

При достаточном сближении двух атомов между ними возникают силы взаимодействия, вызванные наличием в атомах заряженных частиц. Эти междуатомные силы действуют главным образом на внешние электроны, заставляя их двигаться по новым орбитам, охватывающим оба атома. Так создается химическая связь и образуются молекулы.

Наблюдаемые резкие различия свойств газов, жидкости и твердых тел определяются характером взаимодействия между атомами и молекулами. В газах это взаимодействие мало. Атомы и молекулы газа образуют систему свободных, хаотически движущихся частиц.

В жидкостях взаимодействие между частицами значительно больше. Молекулы жидкости располагаются почти вплотную друг к другу и могут перемещаться по объему, занятому жидкостью, весьма медленно.

В твердом теле силы взаимодействия молекул настолько велики, что атомы уже не могут свободно перемещаться и занимают вполне определенное положение в пространстве, совершая вокруг этих положений непрерывные колебания. Размах (амплитуда) этих колебаний зависит от температуры тела. С повышением температуры колебания атомов становятся более интенсивными. Для твердого тела характерно так называемое кристаллическое строение, т. е. закономерное и упорядоченное расположение частиц в пространстве. Атомы твердого тела расположены симметрично друг относительно друга, образуя кристаллическую решетку. Прочность кристалла определяется внутренней симметрией расположения его атомов.

Еще в начале XX в. опытами наших соотечественников академиков Л. И. Мандельштама и Н. Д. Папалекси было доказано, что перенос электрических зарядов в металлах (электрическая проводимость) осуществляется электронами.

Основной отличительной чертой атомов металла является то, что электроны, находящиеся на наружных орбитах, связаны с ядром атомов очень слабо и могут легко оторваться от данного атома. В первом приближении кристаллы металлов можно представить в виде электронного «облака», в котором на определенном расстоянии расположены положительные ионы (т. е. атомы, потерявшие один или несколько электронов). Внешние электроны, оторвавшиеся от своих атомов, хаотически перемещающиеся внутри кристаллической решетки, обычно называются электронами проводимости, так как именно они и осуществляют перенос электрического тока (заряда) в металле. Общее число электронов проводимости в металле очень велико (оно равно общему числу внешних электронов, т. е. около 10^{22} на 1 *см*^{3}). Этим, очевидно, и обусловлена чрезвычайно большая электропроводность, наблюдаемая в металле.

Выше указывалось, что электрическое сопротивление металлов возрастает по мере повышения температуры. Это

повышение сопротивления металла является следствием участившихся столкновений электронов проводимости с узлами кристаллической решетки металла. Повышение температуры практически не изменяет общего числа электронов проводимости в металле, так как все внешние электроны, находившиеся на наружных орбитах, оторвались от своих атомов и свободно движутся в решетке уже при весьма низких температурах, а для вырывания электронов, находящихся на внутренних орбитах, необходима очень высокая температура (обычно больше температуры плавления).

Если в кристаллическую решетку металла попадают атомы посторонней примеси, то они вносят в решетку новые неоднородности в дополнение к тем, которые вызываются тепловыми колебаниями решетки. Поэтому примеси увеличивают электрическое сопротивление металлов.

Изоляторы и полупроводники отличаются от металлов тем, что внешние электроны атомов кристалла прочно связаны с ядром своего атома и не могут так легко отрываться от них. Общее число «свободных» электронов в подобном кристалле мало. Если такой кристалл не содержит примесей и не находится под воздействием ионизирующих факторов (например, света или повышающейся температуры), то он будет изолятором и его электрическая проводимость будет ничтожно мала. Наличие примесей, а также действие ионизации увеличивают электрическую проводимость подобных кристаллов, делая их полупроводниками.

Под влиянием нагревания кристалла (или воздействия света) внешние электроны увеличивают свою энергию и могут оторваться от своих атомов и стать электронами проводимости, способными переносить электрический ток. При повышении температуры здесь, так же как и в металлах, учащаются столкновения электронов с узлами кристаллической решетки. Однако рост числа электронов проводимости в полупроводниках сказывается на их электрической проводимости сильнее, чем влияние числа столкновений электронов с узлами кристаллической решетки. Этим объясняется то, что с повышением температуры электрическое сопротивление полупроводников уменьшается.

Примеси в полупроводнике, так же как и в металле, искажают кристаллическую решетку и увеличивают электрическое сопротивление. Однако в случае полупроводников роль примесей этим не ограничивается. Пусть внутри кристаллической решетки основного вещества распределено некоторое количество посторонней примеси. Предположим,

что у каждого из внесенных атомов электроны наружных орбит слабо связаны с ядром и могут легко покинуть свой атом. Эти электроны, перемещаясь между узлами основной кристаллической решетки, смогут принять участие в переносе электрических зарядов. Таким образом, в рассматриваемом случае примесь как бы вносит в решетку дополнительные электроны проводимости, уменьшая тем самым удельное сопротивление кристалла.

Возможно также и другое влияние примесей на электропроводность кристалла. Возможны случаи, когда каждый из внесенных в решетку атомов примеси обладает большим сродством к электрону, т. е. может принять на свою внешнюю орбиту один или несколько свободных электронов. Присутствие подобных атомов в кристаллической решетке значительно облегчает отрыв электронов с наружных орбит основных атомов решетки. Оторвавшиеся электроны захватываются атомами примеси и закрепляются там. Атом решетки, с наружной орбиты которого ушел электрон, может «притянуть» на его место электрон соседнего атома основной решетки и т. д.

Процесс перехода электрона от одного атома решетки к другому приводит к тому, что место, где имеется недочет электрона, так называемая «электронная дырка», непрерывно и беспорядочно перемещается по всей кристаллической решетке от одного атома к другому. Очевидно, что электронная дырка эквивалентна положительному заряду, так как она образуется вследствие ухода электрона.

Если такой кристалл поместить во внешнее электрическое поле, то движение электронных дырок будет упорядочено и обусловит протекание тока в определенном направлении. Таким образом, в этом случае ток будет вызван не электронами, которые, переходя от одного атома к другому, закрепляются там, а непрерывным движением электронных дырок. Так как электронные дырки обладают положительным зарядом, то они будут двигаться в направлении, противоположном движению электронов. Электропроводность такого рода носит название «дырочной».

В том случае, когда в кристалле одновременно присутствуют оба указанных выше рода примесей, проводимость будет одновременно обусловлена свободными электронами и электронными дырками.

Примеси в полупроводнике являются главными источниками носителей электрического заряда. Этим объясняется

тот факт, что наличие примесей резко уменьшает электрическое сопротивление полупроводника.

Приведенное описание процесса электрической проводимости следует рассматривать как упрощенное и приближенное изложение современной теории электрических свойств твердого тела.

Современная теория работы твердых выпрямителей создана советскими учеными Б. И. Давыдовым, А. Ф. Иоффе, В. Е. Лашкаревым и другими. Согласно этой теории в выпрямителях между полупроводником и одним из электродов имеется тонкий слой, обладающий высоким сопротивлением. Этот слой принято называть запорным. Его сопротивление может изменяться в широких пределах в зависимости от направления и силы тока, проходящего через выпрямитель, чем и обеспечивается эффект выпрямления.

Многочисленные опыты показали. что запорный слой в твердых выпрямителях действительно существует. Его толщина равна примерно 10^{-5} *см*. Было найдено, что в меднозакисном выпрямителе запорный слой расположен между медью (катод) и закисью меди. Он в этом случае представляет собой прослойку химически чистой (лишенной примеси кислорода) закиси меди, обладающей значительно большим удельным сопротивлением по сравнению с остальным слоем закиси меди, содержащей избыточное количество кислорода. Запорный слой образуется в процессе изготовления меднозакисного выпрямителя.

Закись меди обладает «дырочной» проводимостью, т. е. носителями электрических зарядов в этом случае являются положительно заряженные электронные дырки. Число дырок (фиг. 4) в 1 *см*^{3} в запорном слое (слой *1*) значительно меньше (а сопротивление, следовательно, больше), чем в остальной части закиси меди (слой *2*). Вследствие различия концентраций создается переход (диффузия) электронных дырок из слоя *2* в слой *1*. При этом на границе между слоями будут создаваться объемные (пространственные) заряды: в слое *2* — положительный, а в слое *1* — отрицательный. Электрическое поле этих зарядов будет препятствовать переходу дырок до тех пор, пока вовсе не прекратит его. Этот процесс происходит при отсутствии тока через выпрямитель, т. е. еще при образовании запорного слоя.

Если к выпрямителю приложить внешнюю разность потенциалов так, чтобы катод был отрицательным, а анод — положительным, то направление внешнего поля будет способствовать преодолению поля объемных зарядов и росту

диффузии электронных дырок из слоя *2* в слой *1*. Это приведет к насыщению запорного слоя носителями электрических зарядов (дырок). Сопротивление запорного слоя уменьшится и станет равным сопротивлению остальной части полупроводника. Этим осуществится так называемое прямое протекание тока через выпрямительный элемент. При обратной полярности электродов (на катоде «плюс», а на аноде «минус») внешнее электрическое поле совпадает с полем объемных зарядов и не только будет препятствовать дальнейшей диффузии дырок, но и вытеснит все ранее проникшие в запорный слой дырки обратно в слой *2*. Сопротивление запорного слоя при этом резко возрастет, и ток через выпрямительный элемент будет ничтожно мал: установится ток обратного направления.

Таким же образом можно представить действие селенового выпрямителя. Селен также является полупроводником с дырочной проводимостью. Хотя природа запорного слоя селенового выпрямителя до сих пор окончательно не выяснена, но известно, что он расположен между слоем селена и катодом.

СЕЛЕНОВЫЕ ВЫПРЯМИТЕЛИ

Селеновый выпрямительный элемент представляет собой диск или шайбу (подкладка), на которую нанесен тонкий слой селена. На слой селена наплавляется контактный (так называемый катодный) слой из легкоплавкого металла.

Подкладка выпрямительного элемента (нижний электрод) штампуется из листов мягкой стали или алюминия толщиной 0,8 $\div$ 1,5 *мм*. Для выпрямителей, рассчитанных на малые токи, подкладка штампуется в виде дисков диаметром 5 $\div$ 10 *мм*. Для более мощных выпрямителей применяется подкладка в виде шайб с наружным диаметром до 120 *мм*.

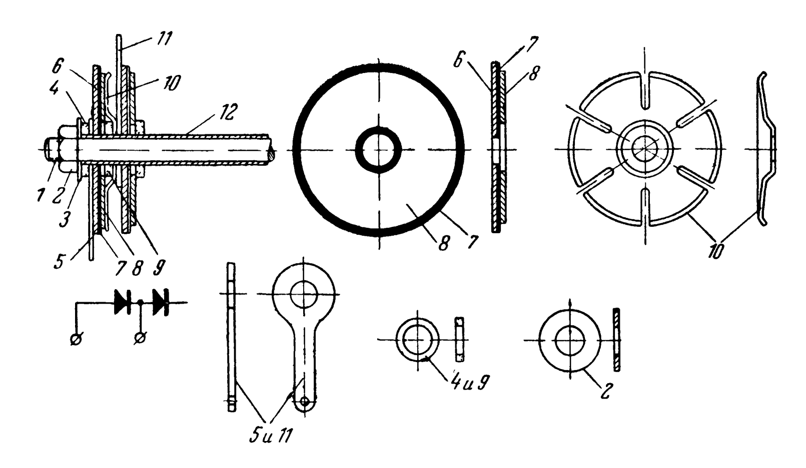
Нанесение слоя селена в большинстве производств осуществляется следующими двумя способами: намазыванием так называемого аморфного селена на горячую подкладку либо расплавлением на подкладке порошкообразного селена.

Верхний электрод (катод) наносится на поверхность селена. В качестве материала верхнего электрода используется сплав олова с кадмием. Иногда в сплав вводят, кроме того, висмут. Нанесение верхнего электрода осуществляется путем разбрызгивания расплавленного металла при помощи специального металлизатора или испарением металла в вакууме.

Для предотвращения короткого замыкания между подкладкой и верхним электродом последний наносится не на всю поверхность выпрямительного элемента. При этом, естественно, рабочая (активная) поверхность выпрямителя несколько уменьшается. Так, например, при наружном диаметре подкладки 45 *мм* верхний электрод наносится на кольцо, ограниченное диаметрами 12 и 40 *мм*. Рабочая поверхность такого элемента будет равна:

$$S_{раб} = \frac{\pi}{4} \cdot (D^2 - d^2) = 11{,}45\ см^2,$$

что составляет примерно 75% всей поверхности подкладки.



Фиг. 5. Детали селенового столбика.

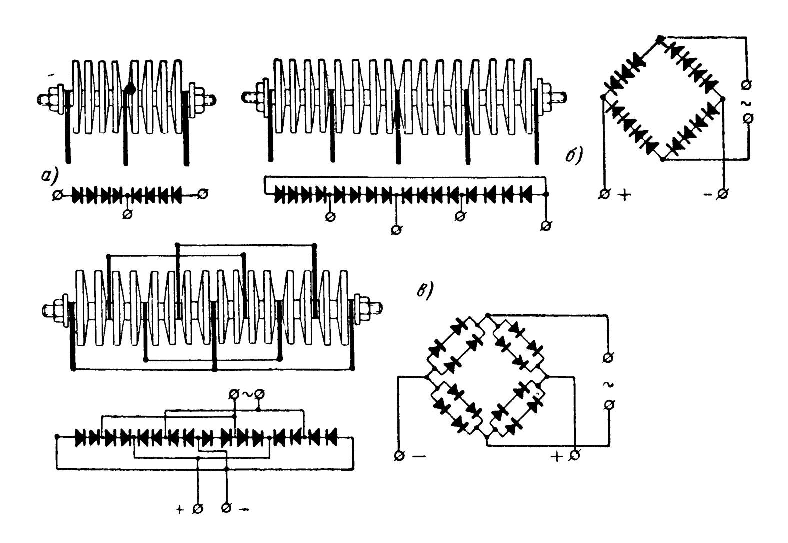
1 — монтажный металлический болт (или шпилька); *2* — металлическая гайка; *3* — металлическая шайба; *4* — изоляционная шайба; *5* — контактная шина от анода; *6* — анод; *7* — слой селена; *8* — катод; *9* — изолирующая шайба; *10* — пружинящая шайба; *11* — контактная шина от катода; *12* — изолирующая трубка.

Выпрямительные элементы обычно собираются в комплект (так называемый выпрямительный столбик). Конструктивное оформление такого комплекта определяется его назначением, мощностью и размерами используемых выпрямительных элементов.

На фиг. 5 показан пример сборки селенового столбика, типичной для выпрямительных элементов (шайб) с наружным диаметром от 18 *мм* и выше. На изображенный здесь монтажный болт *1* можно насадить нужное число выпрямительных шайб (не более 30—40 шт.). Контактные шины

5 и *11* позволяют осуществить любое требуемое соединение выпрямительных элементов по заданной схеме.

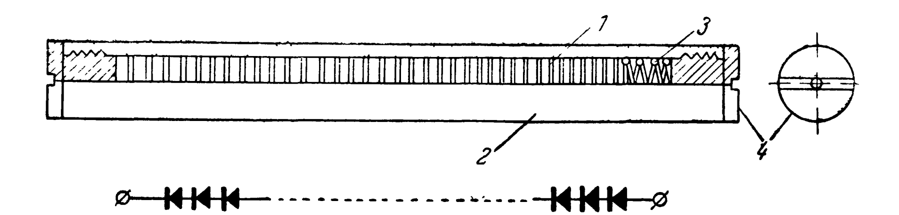
Наиболее распространенные схемы соединения выпрямительных столбиков и соответствующее расположение элементов (шайб) в них показаны на фиг. 6. Размер и количество выпрямительных элементов выбираются в соответствии с заданными значениями выпрямленного напряжения и тока (расчеты приводятся ниже).



Фиг. 6. Схемы соединения выпрямительных элементов в столбики.
а — соединение по схеме с выведенной средней точкой; *б* — соединение по мостовой схеме; *в* — соединение по мостовой схеме (2 элемента включены параллельно).

Как уже указывалось, выпрямители, рассчитанные на малые токи нагрузки, собираются обычно из шайб диаметром 5 ÷ 10 *мм*. В качестве примера такого выпрямителя на фиг. 7 показан столбик из 50 последовательно соединенных выпрямительных шайб диаметром 7 *мм*. Элементы *1* помещены в трубчатую обойму *2*, изготовленную из полистирола (материал для высокочастотной изоляции). Эта трубка предохраняет от короткого замыкания между выпрямительными элементами и служит для них защитным кожухом. Надежный контакт между отдельными элементами достигается с помощью пружин *3* и винтом *4*. Последние используются, кроме того, в качестве выводных зажимов выпрямителя.

Селеновые выпрямители, подобные представленному на фиг. 7, используются в тех случаях, когда требуется высокое напряжение при относительно малых токах нагруз-



Фиг. 7. Высоковольтный селеновый выпрямитель, рассчитанный на малый ток.

1 — выпрямительный элемент; 2 — трубчатая обойма; 3 — пружина; 4 — винт.

ки (например, для питания высоковольтных электронно-лучевых трубок и т. п.).

Основные данные о селеновых выпрямителях отечественного производства приведены в табл. 2, 3 и 4.

Таблица 2

Комплектные столбики селеновых выпрямительных элементов промышленного изготовления (для мостовых схем)

Условное наименование (тип)	Количество элементов в столбике, соединенных:			Размеры столбика, *мм*		Электрические данные при активной нагрузке		
	последовательно, шт.	параллельно, шт.	Всего, шт.	Длина	Диаметр	Подводимое напряжение, *в*	Выпрямленное напряжение, *в*	Выпрямленный ток, *а*
ВС-1	1	2	8	110	100	13	8	6
ВС-2	1	4	16	210	100	13	8	12
ВС-3	2	2	16	210	100	26	16	6
ВС-4	4	1	16	210	100	52	32	3
ВС-5	8	1	32	375	100	120	80	3
ВС-6	12	1	24*	375	100	220	106	2
ВС-45-1	2	2	16	125	45	27	16	0,8
ВС-45-2	4	1	16	125	45	54	32	0,4
ВС-45-5	6	1	24	125	45	75	42	0,4
ВС-45-6	3	2	24	125	45	36	21	0,8

* Число выпрямительных элементов указано только для одного столбика. Схема собирается из двух столбиков.

Данные комплектных селеновых выпрямителей, собранных по мостовой схеме

Тип выпрямителя	Назначение выпрямителя	Выпрямленное напряжение, *в*	Выпрямленный ток, *а*	Напряжение питающей сети, *в*	Регулировка напряжения	Размеры, *мм*	Вес, *кг*
ВСА-1	Для зарядки стартерных аккумуляторов	6/9	12/6	127/220	Нет	320×328×158	20
ВСА-2	То же	7/5	3/5	220/380	Нет	310×240×168	—
ВСА-3М	Для зарядки аккумуляторов . .	До 80	До 8	127/220	Плавная (магнитным шунтом)	480×372×662	72
ВСА-4	Для любой надобности	До 240	До 2	127/220	Нет	560×370×550	65
ВСА-5		36÷64	До 12	127/220	Плавная (автотрансформатором)	560×370×550	65
ВСА-6М		24/12	12/24	127/220	Нет	560×370×550	65
ВСА-7		До 24	До 24	127/220	Нет	560×370×550	65
ВСА-10		6/12/6	12/7/7	127/220		366×170⌀160	12
ВСК-2		4,6±06	0,5	127/220		77×90×82	1,2

Таблица 4

Допустимые токи нагрузки для различных селеновых выпрямительных элементов

Наружный диаметр ($d_н$), *мм*	Рабочая поверхность ($S_{раб}$), $см^2$	Наибольшее число элементов в столбике, шт.	Максимальное допустимое обратное напряжение эффективное на один элемент ($U_{обр}$), *в*	Ток в нагрузке выпрямителя (I_0), *а*	
				Однотактная схема	Двухтактная схема
7	0,07	60	18	0,003	0,006
18	1,1	24	18	0,04	0,08
25	3,0	32	18	0,07	0,15
35	7,2	32	18	0,15	0,3
45	13	32	18	0,3	0,6
67	28	24	16	0,6	1,2
89	47	24	16	1,2	2,4
100	69	24	16	1,5	3,4
112	85	24	16	2,0	4,0

Примечания:

1. Приведенные в таблице допустимые токи нагрузки относятся к случаю, когда выпрямитель работает на чисто активное сопротивление. Если нагрузка имеет емкостный характер или выпрямитель используется для зарядки аккумуляторов, то указанные значения допустимых токов нагрузки надо уменьшить на 20%.
2. Приведенные значения допустимых нагрузок относятся к элементам, собранным в столбики с промежутками, равными около 10% от диаметра. Если собрать столбики с бóльшими промежутками между выпрямительными элементами, то ток нагрузки можно увеличить.
3. Данные таблицы относятся к температуре окружающей среды +35° С.

ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА СЕЛЕНОВЫХ ВЫПРЯМИТЕЛЕЙ

Электрические свойства выпрямительного элемента определяются прежде всего его вольтамперной характеристикой, которая представляет зависимость тока (или плотности тока, т. е. тока, протекающего через 1 $см^2$ рабочей поверхности элемента) от приложенного к элементу напряжения. Вольтамперные характеристики принято снимать при постоянном (по направлению) токе и определенной температуре окружающей среды. На фиг. 8 представлена статическая вольтамперная характеристика выпрямительного элемента, снятая на постоянном токе при температуре окружающей среды 15° С.

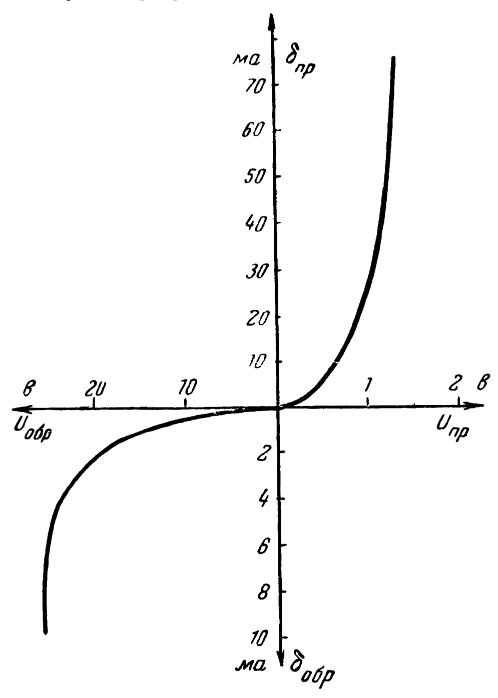
Как видно из характеристики фиг. 8, при плотности прямого тока $\delta_{пр} = 50$ *ма/см*^{2} падение напряжения составляет 1,25 *в*. Таким образом, каждый квадратный сантиметр рабочей поверхности представляет прямому току сопротивление в 25 *ом*. Общее сопротивление выпрямительного

элемента прямому току может быть для данного случая определено в виде:

$$R_i = \frac{25}{S_{раб}},$$

где $S_{раб}$—рабочая поверхность, *см*^{2}.

Из характеристики фиг. 8 видно, что при плотности обратного тока $\delta_{обр} = 2$ *ма/см*^{2} падение напряжения на выпрямительном элементе составляет 17 *в*, т. е. сопротивление обратному току равно 8 500 *ом/см*^{2}.



Фиг. 8. Статическая вольтамперная характеристика селенового выпрямительного элемента.

Известно, что к. п. д. выпрямителя будет тем выше, чем меньше его внутреннее сопротивление. Поэтому естественно считать лучшим выпрямительным элементом тот, который обладает наименьшими значениями сопротивления прямому току и наибольшими значениями сопротивления обратному току.

Обычный селеновый выпрямительный элемент не может нормально работать при обратном эффективном напряжении

$U_{обр}$ больше 16—18 *в*, так как при этом начинают резко возрастать обратные токи.

Для селеновых выпрямителей существует также и «нижний порог» выпрямления, когда при малых значениях приложенного напряжения обратный и прямой токи почти одинаковы. Это имеет место при плотности тока порядка долей *мка/см²*.

Нормальными значениями плотностей токов для обычного селенового выпрямителя принято считать $\delta_{пр} = 50$ *ма/см²* и $\delta_{обр} = 4$ *ма/см²*.

Температура окружающей среды сильно сказывается на выпрямляющих свойствах селенового выпрямителя. Это видно из сопоставления семейства вольтамперных характеристик, приведенных на фиг. 9. Увеличение температуры окружающей среды приводит к уменьшению сопротивления прямому току (объяснение этого явления было приведено выше). Можно считать, что в пределах от +20 до +60° С сопротивление прямому току уменьшается на 1% от первоначального при повышении температуры на 1° С.

Снижение температуры окружающей среды приводит к увеличению прямого сопротивления. Это справедливо в диапазоне температур —40 и +60° С при $U_{пр} < 20$ *в*.

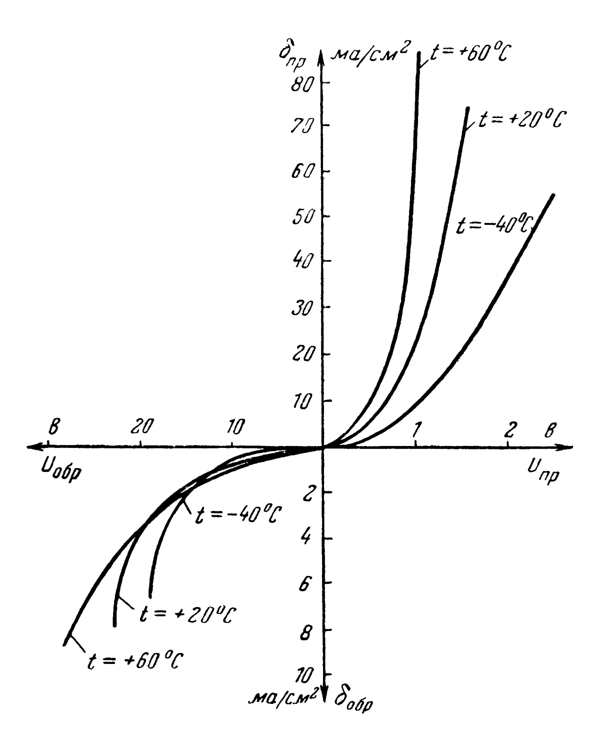
Характер влияния температуры окружающей среды на обратное сопротивление определяется величиной напряжения, приложенного к выпрямительному элементу. При напряжениях $U_{обр} = 10 \div 20$ *в* сопротивление обратному току увеличивается по мере повышения температуры. При малых напряжениях, наоборот, имеет место уменьшение сопротивления с ростом температуры.

Перегрузка выпрямительных элементов по току увеличивает потери в них. Это приводит к перегреву и повышению падения напряжения на зажимах выпрямителя. Кратковременные перегрузки (в 2 — 5 раз), повторяющиеся с большими интервалами (например, перегрузки длительностью в 10 сек., повторяющиеся через каждые 10 мин.), выдерживаются селеновыми выпрямителями безболезненно. Нагрузка импульсного характера с определенной частотой повторения может быть учтена при расчете эффективного значения тока выпрямителя.

Недогрузка выпрямительного элемента по току удлиняет срок его службы.

Расформовка выпрямительных элементов заключается в том, что сопротивление запорного слоя

(т. е., иными словами, сопротивление обратному току) уменьшается с течением времени. Это происходит главным образом при длительном пропускании только прямого тока, а также при долговременном хранении селеновых выпрямителей без использования.



Фиг. 9. Семейство статических вольтамперных характеристик селенового выпрямительного элемента.

При включении выпрямителя после длительного хранения рекомендуется вначале подавать неполное рабочее напряжение и затем постепенно повышать его. При этом, по существу, производится повторная операция формовки. В этом случае лучше всего подключать к выпрямительным элементам напряжение переменного тока.

С т а р е н и е с е л е н о в ы х в ы п р я м и т е л е й состоит в постепенном увеличении сопротивления прямому току с течением времени. Процесс старения селеновых выпря-

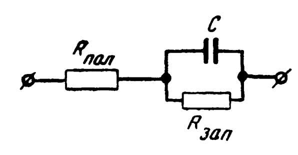
мителей происходит наиболее заметно в первые 1 000 ÷ 2 000 час. их работы. В нормальном режиме работы выпрямителей сопротивление прямому току может возрасти до 25 ÷ 30% относительно первоначальной величины. Старение выпрямителей имеет место также и при их хранении.

Условным сроком службы селенового выпрямителя называют время его непрерывной работы, в течение которого напряжение на выходе выпрямителя снижается на 10% при неизменном напряжении, подводимом к выпрямителю, и нормальной плотности тока. Селеновые выпрямители могут быть также использованы и по истечении условного срока службы, если имеется возможность компенсировать возросшее падение напряжения на выпрямительных элементах. Срок службы отечественных селеновых элементов составляет 5 000 ÷ 10 000 час.

Пробой селеновых выпрямителей заключается в тепловом разрушении части селенового слоя и катодного сплава под действием больших обратных токов, которые, в свою очередь, вызваны большими обратными напряжениями. Обычно пробой происходит при обратных напряжениях с амплитудой 50 ÷ 80 *в* на каждый выпрямительный элемент. Пробой элемента сопровождается искрой, а также оплавлением селена и части катодного сплава. Если причина пробоя устранена, то выпрямитель может продолжать работать, так как пробитое место элемента заплавляется аморфным селеном, не проводящим тока. Иногда при перегреве выпрямителя расплавленный электрод (катодный сплав) заливает промежуток между электродами и тем самым замыкает накоротко два ближайших электрода. В этом случае для дальнейшей нормальной работы выпрямительного элемента необходимо удалить расплавленный металл.

Емкость селенового выпрямителя. Опыт показывает, что в цепи с повышенной частотой селеновый выпрямительный элемент ведет себя как система, обладающая в запирающем направлении емкостью с параллельно включенным сопротивлением. В соответствии с этим выпрямительный элемент можно представить эквивалентной схемой фиг. 10. Емкость C обусловлена наличием между металлом и полупроводником тонкой изолирующей прослойки (запирающего слоя). Величина этой емкости составляет 0,01 ÷ 0,02 *мкф/см*^{2} и зависит от напряжения, приложенного к выпрямительному элементу.

Емкость выпрямительного элемента как бы шунтирует запирающий слой ($R_{зап}$), что, естественно, приводит к дополнительным потерям мощности в слое полупроводника (сопротивление $R_{пол}$ эквивалентной схемы) и к уменьшению выпрямленного напряжения. Влияние собственной емкости выпрямительных элементов сказывается тем сильнее, чем выше частота выпрямляемого тока.



Фиг. 10. Эквивалентная схема выпрямительного элемента.

Усталость (**ползучесть**) выпрямителей сказывается в том, что наблюдается возрастание обратного тока под воздействием обратного напряжения. Это увеличение обратного тока не связано с температурным режимом. Как правило, в селеновых выпрямителях явление усталости наблюдается только при некоторых нарушениях технологического процесса изготовления.

Усталость имеет большое значение для селеновых выпрямителей, используемых в цепях постоянного тока. В этих случаях наибольшее допустимое обратное напряжение составляет около 15 *в* на каждый элемент.

При работе селенового выпрямителя принято считать нормальной температуру окружающей среды +35° С. Перегрев выпрямителей при нагрузке не должен превышать 35° С над температурой окружающей среды. Если температура окружающей среды выше +35° С, то нагрузка выпрямителя должна быть уменьшена в соответствии с данными табл. 5.

Таблица 5

Рекомендуемые токи и напряжения для селеновых выпрямителей при повышенной температуре окружающей среды

Температура окружающей среды, °С	Рекомендуемая нагрузка в % от нормальных значений	
	по току	по напряжению
До +35°	100	100
40°	83/100	100/80
45°	67/83	100/80
50°	47/67	100/80
55°	47/67	80/50
60°	30/47	80/60
65°	30/47	60/40
70°	30	40

Примечание. Уменьшение нагрузки может быть сделано по току или напряжению соответственно указанным в числителях или знаменателях данных таблицы.

Если по условиям эксплуатации выпрямитель должен работать с перегрузкой, то необходимо улучшить условия охлаждения. В таких случаях при сборке столбиков увели-

чиваются промежутки между отдельными элементами, создается искусственное охлаждение и т. п.

Типовые нагрузки, рекомендуемые при температуре окружающей среды +35° C для селеновых элементов и выпрямительных столбиков, указаны в табл. 2 и 4.

Низкая температура окружающей среды для селеновых выпрямителей неопасна. Селеновые выпрямители могут быть использованы при температуре до —40° C. Однако при работе выпрямителей в среде с температурой ниже 0° C заметно увеличиваются потери, обусловленные повышением сопротивления прямому току. Известно, что при работе выпрямителя с температурой окружающей среды —60° C отдаваемая мощность падает на 30% по сравнению с мощностью, отдаваемой выпрямителем при температуре +20° C.

МЕДНОЗАКИСНЫЕ ВЫПРЯМИТЕЛИ

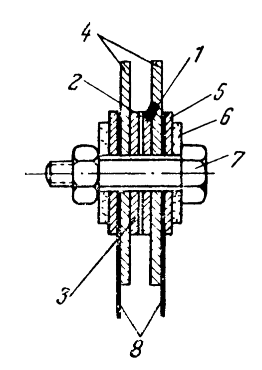
Меднозакисный (купроксный) выпрямительный элемент представляет собой медный диск (или пластину), покрытый путем термической обработки слоем закиси меди.

Для изготовления меднозакисных выпрямителей применяется электролитически очищенная красная медь с весьма малым содержанием примесей (не более 0,02 ÷ 0,04%). Выпрямительные диски (пластины) штампуются из прокатанной ленты такой меди толщиной 1 ÷ 1,5 *мм*. После штамповки поверхность заготовки выравнивается и очищается от жира и загрязнений крепким раствором азотной кислоты.

Для нанесения слоя закиси меди очищенные и промытые диски (пластины) помещаются на 10÷15 мин. в печь, нагретую до 1 020 ÷ 1 030° C (температура печи и время термической обработки определяются сортом меди). При этом происходит окисление меди и образуется слой закиси меди.

Анодом меднозакисного выпрямительного элемента служит обычно прижимная свинцовая шайба. Для уменьшения переходного сопротивления между полупроводником и контактной шайбой поверхность закиси меди покрывается тонким хорошо проводящим слоем графита.

Сборка меднозакисных выпрямительных столбиков производится в основном так же, как и селеновых. На фиг. 11 показан пример сборки меднозакисного выпрямителя. Основ-



Фиг. 11. Сборка меднозакисных выпрямительных элементов в столбики.

1 — медная пластина (шайба), *2* — слой закиси меди; *3* — свинцовая пластина; *4* — пластины для увеличения поверхности охлаждения (радиаторы) *5* — металлическая прижимная шайба, *6* — изолирующая шайба, *7* — стяжной болт, *8* — контактные шины от электродов элемента.

ные данные о меднозакисных выпрямительных элементах приведены в табл. 6 и 7.

Таблица 6

Данные меднозакисных выпрямительных элементов и столбиков

Тип столбика	Количество элементов в столбике, соединенных: последовательно, шт.	параллельно, шт.	всего, шт.	Размеры, *мм*	Электрические данные: подводимое напряжение, *в*	выпрямленное напряжение, *в*	выпрямленный ток, *а*	Схема соединения столбиков	Вес, *кг*
НКС-1	12	3	36	188×10×75	До 50	24/32	1,2/0,6	Двухтактная с выведенной средней точкой трансформатора	1,65
НКС-2	6	3	72	263×10×75	До 50	24/32	1,2	Двухтактная мостовая	—
КВ-1	6	1	6	70×48×46	В зависимости от схемы соединения		0,3*	Отдельные секции могут быть собраны по любой схеме	—
КВ-2	3	2	24	62×48×80	До 20	До 12	1	Двухтактная, мостовая	—
КВ-3	6	1	36	62×48×105	В зависимости от схемы соединения и выпрямления		0,3*	В виде 6 секций	0,25**

* Указано эффективное значение тока для каждой пластины

** Указан вес одной секции.

Таблица 7

Данные комплектных меднозакисных выпрямителей, собранных по мостовой схеме

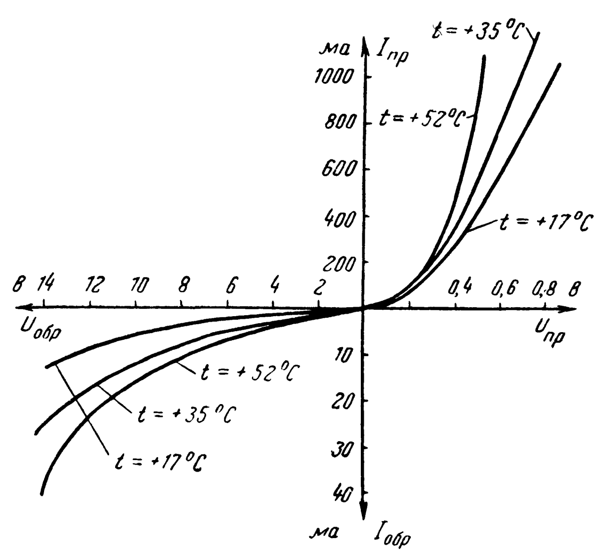
Тип выпрямителя	Назначение выпрямителя	Выпрямленное напряжение, *в*	Выпрямленный ток, *а*	Напряжение питающей сети, *в*	Регулировка	Размеры, *мм*	Вес, *кг*
ТВ-1	Питание цепей накала ламп	4÷6	0,4÷0,6	220		236×210×175	6,5
КП-1	Питание релейных установок	2÷4	1÷1,5	110	Магнитный шунт	236×210×175	6,5
КП-2		2÷4	1÷1,5	220		236×210×175	6,5
КТВ-1	Для зарядки аккумуляторов	13÷35	0,4÷3	110		310×220×200	13
РТВ-1	Для питания реле	До 20	0,05	110	Нет	160×90×90	1,6
РТВ-2		До 20	0,05	110		160×90×90	1,6
ПТВ-1	Для зарядки аккумуляторов	До 2,2	0,5÷2,4	110	Магнитный шунт (плавная)	240×210×175	6,5

ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА МЕДНОЗАКИСНЫХ ВЫПРЯМИТЕЛЕЙ

Электрические свойства меднозакисных выпрямителей во многом схожи со свойствами селеновых выпрямителей. На фиг. 12 представлено семейство статических вольтамперных характеристик меднозакисных выпрямительных элементов. С повышением температуры окружающей среды сопротивление прямому току выпрямителя убывает, при понижении температуры оно возрастает и при температуре примерно —25° С выпрямитель перестает работать.

Сопротивление меднозакисного выпрямительного элемента обратному току заметно падает с повышением температуры окружающей среды. Это ограничивает возможности использования меднозакисных выпрямителей при температуре окружающей среды выше +60° С.

Допустимые плотности токов и обратные напряжения каждого выпрямительного элемента весьма сильно зависят от условия работы и конструкции столбика, в который собираются отдельные элементы. Плотность прямого тока может быть выбрана в пределах от 0,05 ÷ 0,15 *а/см²* в зависимости от условий охлаждения. При нормальной нагрузке и хороших условиях охлаждения на каждый выпрямительный элемент можно подавать обратное напряжение порядка 9 ÷ 12 *в*.



Фиг. 12. Семейство статических вольтамперных характеристик меднозакисного выпрямительного элемента.

При повышенной температуре окружающей среды допускаемое обратное напряжение снижается до 2 ÷ 4 *в*.

У меднозакисных выпрямителей резко выражен процесс старения, состоящий в повышении сопротивления прямому току со временем. Рост сопротивления прямому току особенно заметен в первый период использования свежеизготовленного выпрямительного элемента. Этим объясняется необходимость искусственного старения меднозакисных выпрямителей при их производстве. Для этого элементы меднозакисного выпрямителя выдерживаются в течение 24 час. при температуре +50 ÷ 55° С. Некоторые типы выпрямительных элементов, к которым предъявляются повышенные требования устойчивости работы (например, выпрямители

для измерительных целей), подвергаются искусственному старению при температуре до +90° С более длительное время (вплоть до нескольких месяцев).

Электрический пробой меднозакисного выпрямителя приводит к его окончательной порче и не восстанавливается при ремонте.

Электрическая емкость меднозакисных элементов оценивается примерно теми же значениями величин, что и для селенового выпрямителя, т. е. 0,01 ÷ 0,02 *мкф/см²*.

Влияние влажности и паров кислот имеет особо важное значение на надежность работы меднозакисного выпрямителя. При проникновении влаги к слою закиси меди происходит электролитический пробой выпрямителя. Для защиты выпрямителей от паров воды и кислот применяют различные лакокрасочные покрытия. В ряде случаев может оказаться целесообразным помещение выпрямителей в сосуд с трансформаторным маслом.

Усталость меднозакисных выпрямителей сказывается еще резче, чем в селеновых выпрямителях.

Как уже указывалось, меднозакисные выпрямители надежно работают в интервале температур от —25 до +60° С. При повышении окружающей температуры рекомендуется, как и для селеновых выпрямителей уменьшать напряжение и ток нагрузки.

При подборе отдельных выпрямительных элементов для сборки выпрямительных столбиков в схемах последовательного и параллельного соединения следует обращать особенное внимание на одинаковость их вольтамперных характеристик. Если включить параллельно несколько выпрямительных элементов с разными сопротивлениями прямому току, то общая нагрузка выпрямителя будет распределена между элементами неравномерно. Элементы с меньшим сопротивлением прямому току будут перегружены по току, будут сильнее нагреваться и быстрее стариться. В результате перегруженные элементы преждевременно выйдут из строя.

При последовательном соединении выпрямительных элементов важно, чтобы обратное напряжение на каждом элементе было одинаковым. Допустимый разброс значений обратного напряжения не должен превышать 2 ÷ 3 *в*. В противном случае возможен электрический пробой отдельных выпрямительных элементов.

СРАВНЕНИЕ СЕЛЕНОВЫХ И МЕДНОЗАКИСНЫХ ВЫПРЯМИТЕЛЕЙ

Сравнение и выбор типа выпрямителя могут быть сделаны на основании сопоставления следующих показателей:

а) относительная стоимость и сложность изготовления;

б) электрические и эксплуатационные свойства.

Стоимость материалов для изготовления селенового и меднозакисного выпрямителя одинаковой мощности почти одинакова. Из материалов, необходимых для производства селеновых выпрямителей, наиболее дорогими являются составляющие катодного сплава (олово, кадмий, висмут). Стоимость селена невелика, тем более, что значительная часть отходов селена, которые получаются при производстве выпрямителей, могут быть восстановлены и использованы.

При производстве меднозакисных выпрямителей приходится считаться с большим расходом меди и свинца. Если учесть, что по своим электрическим свойствам меднозакисные выпрямители уступают селеновым (меньше допустимое значение обратного напряжения), то станет ясным преимущество селеновых выпрямителей.

Эксплуатационные качества селеновых выпрямителей значительно выше по своим основным показателям, чем у меднозакисных (хотя бы по рабочему диапазону температур окружающей среды). Сопоставление эксплуатационных и электрических показателей селеновых и меднозакисных выпрямителей может быть сделано на основании данных табл. 8.

Таблица 8

Сравнение показателей меднозакисных и селеновых выпрямителей

Основные показатели	Выпрямители	
	меднозакисный	селеновый
Максимальная положительная температура, допустимая при работе, °С	До 60	До 75
Минимальная отрицательная температура, допустимая при работе, °С	До 20	До 40
Плотность прямого тока, *ма/см²*:		
а) при естественном охлаждении	До 50	До 50
б) при искусственном охлаждении	До 150	До 150
Допустимое обратное напряжение (эффективное значение), *в*	9÷12	15÷18
Падение напряжения на одном выпрямительном элементе (характеризует сопротивление прямому току), *в*	0,8÷1	1,15÷1,4

При сравнении меднозакисных и селеновых выпрямителей также надо учитывать следующее.

1. Значительно меньшее проявление усталости у селеновых выпрямителей.

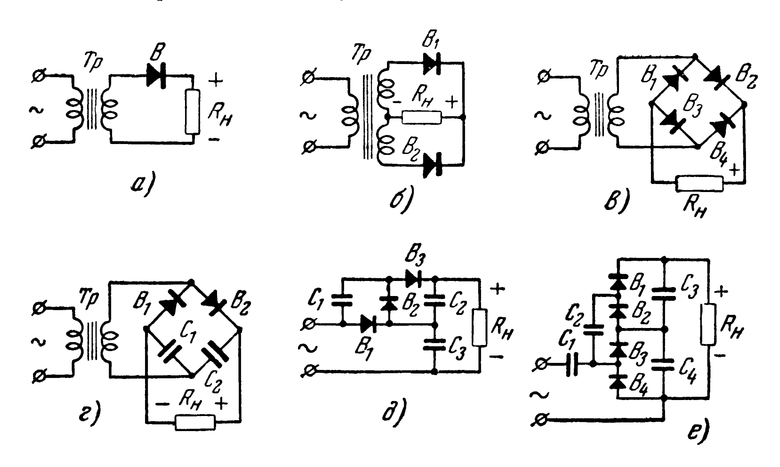
2. Пробой селеновых элементов не всегда сопровождается окончательной их порчей, в то время как для меднозакисных элементов пробой неизбежно выводит их из строя.

3. Вес меднозакисного элемента получается больше веса селенового (при одной и той же мощности).

4. Селеновые выпрямители переносят перегрузку значительно легче меднозакисных.

СХЕМЫ ВЫПРЯМЛЕНИЯ И СООТНОШЕНИЯ ДЛЯ НИХ

Наиболее распространенные схемы выпрямителей малой мощности приведены на фиг. 13.



Фиг. 13. Схемы выпрямления.

а — однотактная; *б* — двухтактная с выведенной средней точкой от обмотки трансформатора; *в* — двухтактная мостовая; *г* — схема удвоения напряжения; *д* — схема утроения напряжения; *е* — схема учетверения напряжения.
В — выпрямительный элемент; $R_н$ — сопротивление нагрузки; *Тр* — силовой трансформатор; *С* — конденсатор.

Действие схем и расчетные соотношения для них зависят от характера нагрузки, на которую выпрямитель работает. Можно различать три вида нагрузок выпрямителя: активную, емкостную и индуктивную.

Влияние характера нагрузки на отношение тока вторичной обмотки трансформатора к выпрямленному току $(I_2/I_в)$ при различных схемах выпрямления показано в табл. 9.

Таблица 9

Отношение токов $I_2/I_в$ в зависимости от схемы и нагрузки выпрямителя

Схема выпрямителя	В выпрямителях при:		
	активной нагрузке	индуктивной нагрузке	емкостной нагрузке
Однотактная	1,57	—	2,5
Двухтактная с выведенной средней точкой трансформатора	0,78	0,71	1,2
Двухтактная по схеме моста	1,11	1	1,7

При определении расчетных соотношений для выпрямительных схем наиболее удобно считать их идеальными, т. е. пренебрегать потерями во всех элементах выпрямительной схемы (в трансформаторе, выпрямительном элементе, фильтре и т. д.). Имеющиеся же потери обычно учитываются дополнительно для каждого конкретного случая в зависимости от выбранного типа выпрямительного элемента, конструктивных особенностей трансформатора, дросселя сглаживающего фильтра и т. п. Такой порядок дает возможность вести расчет для наиболее общих случаев выпрямления.

Расчетные соотношения для различных схем выпрямителей с активной нагрузкой без учета потерь приведены в табл. 10.

ОДНОТАКТНАЯ СХЕМА ВЫПРЯМЛЕНИЯ С АКТИВНОЙ НАГРУЗКОЙ

Однотактная схема выпрямления с активной нагрузкой и графики токов приведены на фиг. 14. Такую схему выпрямления часто называют однополупериодной. Этим наименованием подчеркивается, что ток проходит через выпрямительный элемент и нагрузку только в течение одной половины периода, пока электрод выпрямительного элемента, называемый анодом, будет находиться под положительным потенциалом относительно катода (второго электрода выпрямительного элемента). Направление тока через выпрямительный элемент обозначено стрелкой.

Таблица 10

Соотношения для выпрямителя без потерь с активной нагрузкой

Определяемые величины	Обозначения	Схема выпрямления: однотактная	Схема выпрямления: двухтактная с выведенной точкой трансформатора	Схема выпрямления: двухтактная по схеме моста
Постоянная составляющая выпрямленного напряжения . .	U_0	U_0	U_0	U_0
Эффективное значение напряжения на вторичной обмотке трансформатора	U_2	2,22 U_0	1,11 U_0	1,11 U_0
Амплитуда обратного напряжения, приложенного к каждому столбику	$U_{обр. макс}$	3,14 U_0	3,14 U_0	1,57 U_0
Амплитуда переменной составляющей выпрямленного напряжения	$U_{в. макс}$	1,57 U_0	0,67 U_0	0,67 U_0
Эффективное значение тока выпрямительного элемента	$I_в$	1,57 I_0	0,78 I_0	0,78 I_0
Эффективное значение тока вторичной обмотки трансформатора	I_2	1,57 I_0	0,78 I_0	1,11 I_0
Эффективное значение тока первичной обмотки трансформатора	I_1	1,21 nI_0	1,11 nI_0	1,11 nI_0
Коэффициент использования вторичной обмотки трансформатора	$к_2$	0,286	0,58	0,81
Коэффициент использования первичной обмотки трансформатора	$к_1$	0,372	0,81	0,81

Фиг. 14. Однотактная схема выпрямления с активной нагрузкой и графики тока и напряжения.

Кривая для тока i_2 во вторичной обмотке трансформатора, приведенная на фиг. 14, характерна для идеальных выпрямительных элементов.

Прерывистая форма выпрямленного тока (напряжения) в виде полусинусоид получается при работе выпрямителя на нагрузку активного характера без сглаживающего фильтра.

Под активной нагрузкой выпрямителя понимают такую нагрузку, при которой отсутствует сдвиг по фазе между током и напряжением [1], так что форма кривой тока и напряжения во вторичной обмотке трансформатора, выпрямительном элементе и нагрузке будет одинакова. Активной нагрузкой для выпрямителя являются, например, накальные цепи приемно-усилительных и генераторных ламп, анодные цепи тех же ламп при их питании без сглаживающего фильтра.

Для идеального выпрямителя без потерь, работающего по схеме фиг. 14, расчетные соотношения могут быть получены из табл. 10.

Коэффициент трансформации при заданном напряжении сети

$$n = \frac{U_2}{U_1} = \frac{w_2}{w_1};$$

здесь w_2 и w_1 — число витков, соответственно вторичной и первичной обмоток трансформатора.

Коэффициент использования вторичной обмотки

$$k_2 = \frac{U_0 \cdot I_0}{U_2 \cdot I_2}.$$

Коэффициент использования первичной обмотки

$$k_1 = \frac{U_0 \cdot I_0}{U_1 \cdot I_1}.$$

Следует отметить, что ток в первичной обмотке трансформатора изменяется не по синусоидальному закону, так как постоянная составляющая выпрямленного тока не трансформируется. Ток в первичной обмотке трансформатора показан на фиг. 14. Приведенные в табл. 10 зависимости для токов первичной обмотки не учитывают тока холостого хода

---

[1] Сдвиг фаз между током и напряжением означает, что они проходят через свои нулевые и максимальные значения не одновременно.

трансформатора, который может быть вычислен дополнительно.

По схеме фиг. 14 можно сделать следующие замечания:

а) постоянная составляющая выпрямленного напряжения значительно меньше эффективного значения напряжения вторичной обмотки трансформатора;

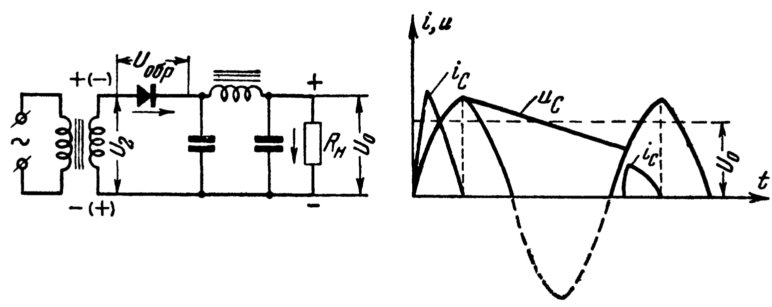
б) ток вторичной обмотки больше постоянной составляющей выпрямленного тока;

в) выпрямленное напряжение на нагрузке имеет пульсирующий характер.

Коэффициенты использования трансформатора в схеме фиг. 14 невелики. Пульсирующий характер выпрямленного напряжения делает эту схему пригодной только для питания цепей накала мощных ламп и некоторых релейных схем.

ОДНОТАКТНАЯ СХЕМА ВЫПРЯМЛЕНИЯ С ЕМКОСТНОЙ НАГРУЗКОЙ

На фиг. 15 приведена наиболее часто встречающаяся однотактная схема выпрямления с емкостной нагрузкой. Емкостный характер нагрузки определяется наличием в схеме сглаживающего фильтра, который начинается с емкости.



Фиг. 15. Однотактная схема выпрямления с емкостной нагрузкой. u_C — напряжение на конденсаторе; i_C — зарядный ток конденсатора.

Процесс выпрямления тока в схеме фиг. 15 может быть пояснен следующим образом. При первом включении выпрямителя, когда напряжение на зажимах конденсатора равно нулю, ток через выпрямительный элемент будет протекать с того момента, когда начнется положительная полуволна напряжения, приложенного к элементу. При этом конденсатор начнет заряжаться. По мере увеличения заряда конденсатора напряжение на его зажимах будет возрастать

и вызовет уменьшение зарядного тока. Когда напряжение на зажимах конденсатора станет почти равным амплитудному значению напряжения на зажимах вторичной обмотки трансформатора, ток через выпрямительный элемент прекратится и заряд конденсатора закончится.

В нагруженном выпрямителе за время отсутствия тока через выпрямительный элемент конденсатор будет разряжаться через сопротивление нагрузки. По мере разряда конденсатора напряжение на его зажимах падает и, следовательно, выпрямленное напряжение будет пульсирующим.

Очевидно, что при отсутствии сопротивления нагрузки, т. е. при холостом ходе, выпрямленное напряжение достигнет максимального значения

$$U_{0x.x} = 1{,}41\, U_2 = U_{2\,макс}$$

и не будет пульсировать.

При описании процесса выпрямления подразумевалось, что в схеме фиг. 15 имеется один конденсатор. Однако описанный процесс действителен и в том случае, когда в фильтре имеются два конденсатора.

Если емкость конденсатора и сопротивление нагрузки малы (ток нагрузки велик), то конденсатор разрядится быстро. Если же выбрать емкость конденсатора и сопротивление нагрузки большими, то разряд конденсатора и убывание напряжения на его зажимах будут происходить медленнее. При соответствующем выборе емкости конденсатора и заданном значении сопротивления нагрузки может оказаться, что к началу каждой последующей положительной полуволны напряжения, приложенной к аноду выпрямительного элемента, конденсатор полностью не разрядится. В этом случае ток через элемент начнет проходить лишь после того, как сравняются мгновенные значения напряжений на конденсаторе и вторичной обмотке трансформатора. Таким образом, время протекания тока через выпрямительный элемент сократится и произойдет то, что принято называть отсечкой тока. Очевидно, что рассмотренные процессы заряда и разряда конденсатора будут периодически повторяться.

В схеме фиг. 15 емкости конденсаторов выбираются обычно так, чтобы время протекания тока через выпрямительный элемент было равно примерно одной четверти периода переменного напряжения.

Неполный разряд конденсатора приводит к увеличению постоянной составляющей выпрямленного напряжения, не-

смотря на то, что напряжение на зажимах вторичной обмотки трансформатора остается таким же, как в схеме фиг. 14. Следовательно, включение емкостей параллельно сопротивлению нагрузки приводит к уменьшению пульсации выпрямленного напряжения.

При выборе типа выпрямительного элемента для схемы фиг. 15 надо уменьшать допустимые значения токов нагрузки, указанные в табл. 4, на 20%. Такое уменьшение допустимого тока нагрузки выпрямительного элемента принято на основании опытных данных и связано с тем, что при работе выпрямителя на емкостную нагрузку увеличивается эффективное значение тока элемента из-за больших кратковременных зарядных токов.

Известно, что для выпрямителя без потерь с активной нагрузкой в однотактной схеме

$$\frac{I_в}{I_0} = 1{,}57,$$

а для того же выпрямителя, работающего на нагрузку емкостного характера

$$\frac{I_в}{I_0} \approx 2{,}5;$$

здесь I_0 — постоянная составляющая выпрямленного тока;
$I_в$ — эффективное значение тока в выпрямительном элементе.

Таким образом, в случае емкостной нагрузки отношение $I_в/I_0$ (а следовательно, и I_2/I_0) возрастает по сравнению с активной нагрузкой больше чем в полтора раза. Это приводит к значительному увеличению размеров трансформатора и выпрямительных элементов, а также к увеличению потерь в последних и ухудшению использования трансформатора по току и напряжению. Обратное напряжение, приложенное к выпрямительному элементу во время отрицательной полуволны переменного напряжения $U_{обр}$, почти в 2 раза превышает амплитудное значение напряжения на зажимах вторичной обмотки трансформатора $U_{2\,макс}$:

$$U_{обр} = U_{2\,макс} + U_C \approx 2U_{2\,макс};$$

здесь U_C — напряжение на зажимах конденсатора.

Суммирование напряжений трансформатора и конденсатора при отрицательной полуволне напряжения непосред-

ственно вытекает из полярности обратного напряжения в схеме фиг. 15, где плюс и минус в скобках обозначают полярность напряжения на зажимах вторичной обмотки трансформатора при отсутствии проводимости тока выпрямительным элементом.

В случае применения полупроводниковых выпрямителей увеличение обратного напряжения связано с необходимостью включения большого числа последовательно соединенных элементов, так как допустимое значение обратного напряжения для каждого элемента весьма невелико.

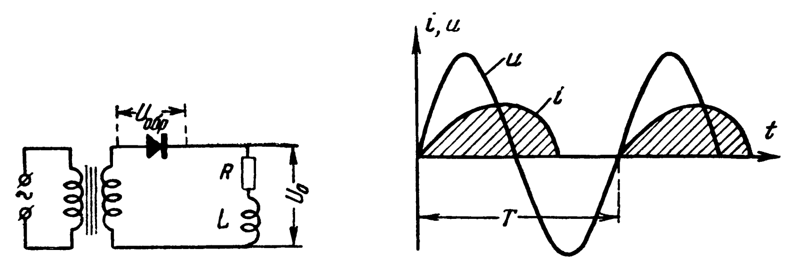
Если выпрямитель используется для зарядки аккумуляторов, то условия его работы весьма близки к случаю нагрузки емкостного характера. Ток будет протекать через выпрямительный элемент в течение той части положительного полупериода, когда напряжение на зажимах вторичной обмотки трансформатора будет больше напряжения на зажимах аккумулятора. Таким образом, ток через выпрямительный элемент будет определяться напряжением аккумулятора и напряжением на зажимах вторичной обмотки трансформатора. Если напряжение на зажимах вторичной обмотки трансформатора не регулируется, то ток в выпрямителе будет уменьшаться по мере заряда аккумулятора, так как напряжение на зажимах аккумулятора будет возрастать по мере его зарядки.

При расчете выпрямителя однотактной схемы, используемого для зарядки аккумуляторов, следует учесть указанное выше увеличение эффективного значения тока выпрямительного элемента.

ОДНОТАКТНАЯ СХЕМА ВЫПРЯМЛЕНИЯ С ИНДУКТИВНОЙ НАГРУЗКОЙ

При работе однотактной схемы выпрямления на нагрузку индуктивного характера (фиг. 16) возрастает время протекания тока через выпрямитель, причем эффективные значения токов в нем и во вторичной обмотке трансформатора уменьшаются и приближаются к значениям постоянной составляющей выпрямленного тока. Время протекания тока и эффективные значения токов в выпрямительном элементе и трансформаторе определяются соотношением последовательно соединенных активного и индуктивного сопротивлений нагрузки (R и ωL). Так, например, при работе выпрямителя на электромагнитное реле активная составляющая сопротивления нагрузки определяется сопротивлением

обмотки реле постоянному току, а индуктивная составляющая сопротивления определится индуктивностью обмотки реле (L) и частотой пульсации выпрямленного напряжения ($\omega = 2\pi f_n$). Наличие чисто индуктивного сопротив-



Фиг. 16. Однотактная схема выпрямления с индуктивной нагрузкой
R — активная нагрузка; L — индуктивная нагрузка.

ления физически немыслимо, так как индуктивность создается обмоткой, которая всегда обладает активным сопротивлением.

Схема фиг. 16 применяется очень редко, так как индуктивность L снижает среднее значение выпрямленного напряжения, а переменные слагающие выпрямленного тока и напряжения очень велики.

ДВУХТАКТНЫЕ СХЕМЫ ВЫПРЯМЛЕНИЯ С АКТИВНОЙ НАГРУЗКОЙ

Различают два вида двухтактных схем выпрямления:

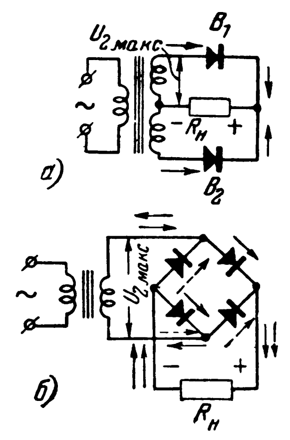
а) двухтактная схема выпрямления с выведенной средней точкой обмотки трансформатора (фиг. 17,*а*);

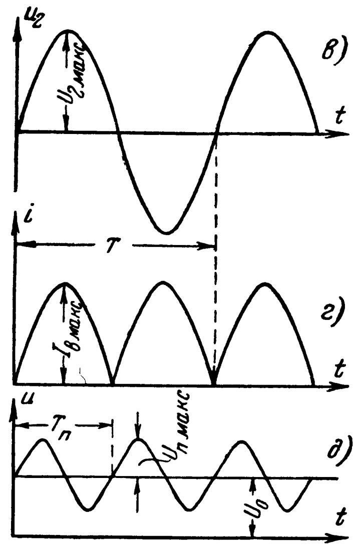
б) двухтактная мостовая схема выпрямления (фиг. 17,*б*).

В схемах фиг. 17 происходит выпрямление обеих полуволн напряжения переменного тока. Выпрямительные элементы B_1 и B_2 схемы фиг. 17,*а* работают поочередно, чередуясь каждые полпериода. Ток протекает через тот элемент, анод которого находится под положительным потенциалом относительно катода. Если анод одного элемента находится под положительным потенциалом, то анод второго в этот же момент времени находится под отрицательным потенциалом (так как аноды присоединены к крайним зажимам вторичной обмотки трансформатора). В результате совместного действия обоих выпрямительных элементов по сопротивлению нагрузки в течение всего периода

протекает ток одного направления. Как видно из фиг. 17,*г*, ток в нагрузке имеет пульсирующий характер, причем частота пульсации соответствует двойной частоте тока в сети.

Процесс выпрямления тока в схеме фиг. 17,*б* существенно не отличается от описанного для схемы с выведенной





Фиг. 17. Двухтактные схемы выпрямления.

а — с выведенной средней точкой трансформатора; *б* — мостовая; *в* — кривая напряжения вторичной обмотки трансформатора; *г* — кривая выпрямленного тока до фильтра; *д* — постоянная и переменная составляющие выпрямленного напряжения до фильтра.

средней точкой обмотки трансформатора. В выпрямлении поочередно участвуют два последовательно соединенных плеча моста, причем пары плеч чередуются между собой каждые полпериода. Выпрямленный ток протекает через два последовательно соединенных выпрямительных элемента моста и сопротивление нагрузки. Направление тока в каждый полупериод показано стрелками (сплошной стрелкой — для одного полупериода, пунктирной стрелкой—для второго полупериода).

Для выпрямительных схем фиг. 17 расчетные соотношения могут быть получены из табл. 10.

Коэффициенты использования обмоток трансформатора определяют размеры трансформатора для выбранной схемы выпрямления. Малые коэффициенты использования обмоток трансформатора соответствуют бо́льшим размерам трансформатора и наоборот. Чем больше мощность выпрямителя,

тем важнее выбрать схему выпрямления с наибольшими коэффициентами использования обмоток трансформатора, так как размеры и вес трансформатора в значительной мере определяют размеры и стоимость выпрямителя. Так, например, при использовании полупроводниковых выпрямителей на большие мощности следует, очевидно, выбрать схему моста, обеспечивающую большие значения коэффициентов использования обмоток трансформатора, а стало быть, и меньшие его размеры.

Сопоставляя соотношения, полученные для однотактных и двухтактных схем выпрямления, можно сделать следующие выводы:

1. В двухтактных схемах выпрямления получается меньшая пульсация выпрямленного тока (напряжения), причем частота пульсации равна удвоенной частоте тока в сети, что значительно облегчает сглаживание тока и упрощает устройство сглаживающих фильтров.

2. В двухтактных схемах более полно используется трансформатор и имеется возможность получить заданную мощность выпрямленного тока с трансформаторами меньших размеров, чем при использовании однотактных схем выпрямления.

Характер нагрузки в двухтактных схемах выпрямления сказывается так же, как и в однотактных схемах. При работе выпрямителя на нагрузку емкостного характера здесь также следует учитывать увеличение эффективного значения тока выпрямительного элемента.

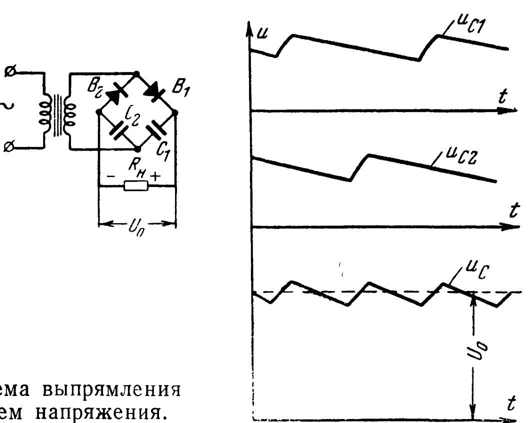
СХЕМЫ ВЫПРЯМЛЕНИЯ С УМНОЖЕНИЕМ НАПРЯЖЕНИЯ

Для повышения выпрямленного напряжения при заданном напряжении на вторичной обмотке трансформатора (или в сети переменного тока) либо при отсутствии силового трансформатора с необходимым коэффициентом трансформации применяют схемы выпрямления с одновременным умножением напряжения. Принципиально можно получить любую кратность умножения напряжения. Практически используют схемы умножения в 2, 3 и 4 раза.

Наиболее часто встречающаяся схема выпрямления с удвоением напряжения представлена на фиг. 18. Эта схема представляет собой двухтактный выпрямитель с трансформатором. Каждый выпрямительный элемент работает здесь на емкости C_1 или C_2, причем нагрузка выпрямителя

$R_н$ включена параллельно обоим конденсаторам C_1 и C_2, соединенным последовательно.

Одна полуволна напряжения переменного тока выпрямляется одним элементом, а вторая полуволна — вторым. В течение одного полупериода ток протекает по выпрямительному элементу B_1, сопротивлению нагрузки $R_н$ и конденсатору C_2. Во время другого полупериода ток пройдет



Фиг. 18. Схема выпрямления с удвоением напряжения.

через конденсатор C_1, сопротивление нагрузки $R_н$ и элемент B_2. Таким образом, каждый раз при протекании тока через один из выпрямительных элементов схемы происходит заряд одного из конденсаторов. Оба конденсатора соединены последовательно, что и обеспечивает удвоение выпрямленного напряжения, подводимого к нагрузке.

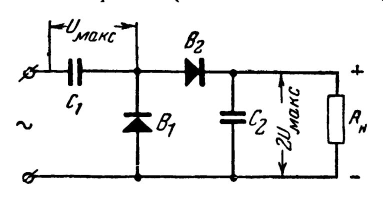
Удвоение выпрямленного напряжения в схеме фиг. 18 будет иметь место лишь при условии, что сопротивление нагрузки достаточно велико (т. е. при малом токе нагрузки). В этом случае конденсаторы мало разрядятся за время отсутствия тока через выпрямительные элементы. При $R_н = \infty$ конденсаторы заряжаются до напряжения, равного амплитудному значению напряжения на зажимах вторичной обмотки трансформатора, а напряжение на зажимах последовательно соединенных конденсаторов C_1 и C_2 будет:

$$U_0 = 2U_{2\,макс} = 2\sqrt{2}\,U_2,$$

где U_2 — эффективное значение напряжения на вторичной обмотке трансформатора.

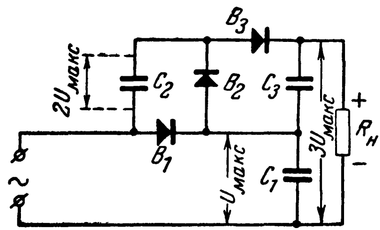
Приведенное значение выпрямленного напряжения является предельно возможным. Величина пульсации будет зависеть от емкости конденсаторов C_1 и C_2 и от сопротивления нагрузки $R_н$. Расчет схемы фиг. 18 может быть сделан таким же образом, как и для однотактной схемы с емкостной нагрузкой без удвоения напряжения.

Схема фиг. 18 применяется для выпрямления малых токов, а также для получения высоких выпрямленных напряжений при небольших размерах силового трансформатора.



Фиг. 19. Бестрансформаторная схема выпрямления с удвоением напряжения.

Для удвоения напряжения, кроме того, может быть применена бестрансформаторная однотактная схема выпрямления, представленная на фиг. 19. Процесс выпрямления с одновременным удвоением напряжения в этой схеме можно объяснить следующим образом. В течение положительного полупериода переменного напряжения конденсатор C_1



Фиг. 20. Схема выпрямления с утроением напряжения.

заряжается через элемент B_1 до напряжения $U_{макс}$. Во второй полупериод, когда элемент B_1 тока не проводит, к элементу B_2 приложено суммарное напряжение конденсатора C_1 и сети, как последовательно соединенных источников э. д. с., и происходит заряд конденсатора C_2 до напряжения $2U_{макс}$. Параллельно конденсатору C_2 присоединяется сопротивление нагрузки $R_н$.

В обеих схемах выпрямления с удвоением напряжения

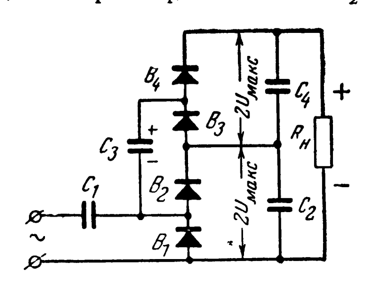
имеют место значительные пульсации выпрямленного напряжения. Для уменьшения пульсации используются сглаживающие фильтры.

На фиг. 20 приведена схема выпрямления с утроением напряжения, представляющая собой дальнейшее развитие схемы удвоения напряжения. Действие схемы фиг. 20 может быть описано следующим образом.

Когда на аноде выпрямительного элемента B_1 имеется положительный потенциал относительно катода, происходит заряд конденсатора C_1 до напряжения $U_{макс}$, т. е. до амплитудного значения напряжения на зажимах вторичной обмотки трансформатора или напряжения сети переменного тока. Во второй полупериод переменного напряжения, когда полярность напряжения, подводимого к схеме, изменится, окажется, что напряжение сети переменного тока будет включено последовательно с напряжением конденсатора C_1 и через выпрямительный элемент B_2 конденсатор C_2 зарядится до напряжения $2U_{макс}$.

В следующий полупериод переменного напряжения, когда возобновится заряд конденсатора C_1, элемент B_2 будет заперт, а элемент B_3 даст возможность конденсатору C_2 разрядиться на конденсатор C_3. Напряжение на зажимах C_3 станет равным $2U_{макс}$.

Так как выпрямленное напряжение снимается с последовательно соединенных конденсаторов C_1 и C_3, то напряжение на нагрузке $R_н$ будет равно $3U_{макс}$.



Фиг. 21. Схема выпрямления с учетверением напряжения.

Приведенные рассуждения верны только при соответствующем подборе емкостей конденсаторов C_1, C_2 и C_3. Все приведенные выше рассуждения о пульсации выпрямленного напряжения и необходимости использования сглаживающих фильтров могут быть целиком применены и к схеме фиг. 20.

Для умножения выпрямленного напряжения в 4 раза может быть использована схема, показанная на фиг. 21. Процессы, происходящие в этой схеме, аналогичны процессам в схеме фиг. 19. Легко видеть, что часть схемы фиг. 21, включающая конденсаторы C_1, C_2 и выпрямительные элементы B_1 и B_2, подобна схеме удвоения напряжения.

В результате действия этой части схемы на конденсаторе C_2 появится напряжение $2U_{макс}$. Конденсатор C_2, разряжаясь через элементы B_3 и B_1 (за время, когда анод элемента B_1 находится под положительным потенциалом), зарядит конденсатор C_3 до напряжения $2U_{макс}$. Выпрямительный элемент B_4 при этом заперт (если элемент B_3 проводит ток, то анод элемента B_4 находится под отрицательным потенциалом относительно своего катода). В следующий полупериод переменного напряжения, когда элемент B_3 запирается, конденсатор C_3. разряжаясь через элемент B_4, зарядит конденсатор C_4 до напряжения $2U_{макс}$. Таким образом, сопротивление нагрузки $R_н$, подключенное к последовательно соединенным конденсаторам C_2 и C_4, будет находиться под суммарным напряжением $4U_{макс}$.

Все приведенные рассуждения верны лишь для того случая, когда ток нагрузки мал и конденсаторы C_2 и C_4 не успевают полностью разрядиться через сопротивление нагрузки.

Схемы умножения напряжения целесообразно применять в сочетании с полупроводниковыми выпрямителями, так как последние не имеют цепей накала. Выпрямители могут быть скомбинированы из любого числа последовательно соединенных выпрямительных элементов (селеновых или меднозакисных шайб) в зависимости от заданных значений выпрямленного напряжения.

ПОТЕРИ В ВЫПРЯМИТЕЛЯХ

Потери в выпрямителях складываются из потерь в отдельных частях выпрямительной установки: в силовом трансформаторе, выпрямительных элементах и сглаживающем фильтре.

Расчетные формулы, приведенные в табл. 10 получены для идеальных выпрямителей без учета потерь.

Потери в отдельных элементах выпрямительной установки вызовут уменьшение выпрямленного напряжения на нагрузке, если они не будут компенсированы увеличением напряжения на вторичной обмотке силового трансформатора. В общем случае постоянная составляющая выпрямленного напряжения при отключенной нагрузке выпрямителя (т. е. напряжение холостого хода выпрямителя)

$$U_{0\,x.x} = U_0 + \Delta U_{Тр} + \Delta U_B + \Delta U_ф,$$

где U_0 — постоянная составляющая выпрямленного напряжения на нагрузке;

ΔU_{Tp} — падение напряжения вследствие наличия потерь в трансформаторе;

ΔU_B — падение напряжения вследствие наличия потерь в выпрямительном элементе;

$\Delta U_ф$ — падение напряжения вследствие потерь в фильтре.

Каждая из указанных составляющих падения выпрямленного напряжения может быть вычислена с достаточной точностью. В большинстве случаев при технических расчетах можно ограничиться приближенными вычислениями их.

Потери в трансформаторе складываются из двух составляющих: потерь в стали сердечника и потерь в меди обмоток. В трансформаторах малой мощности преобладают потери в меди. Теряемая электрическая энергия выделяется в виде тепла в сердечнике и обмотках трансформатора. Падение напряжения вследствие потерь в обмотках трансформатора может быть определено из выражения

$$\Delta U_{Tp} = I_0 \cdot R_{Tp},$$

где $R_{Tp} = R_2 + n^2 \cdot R_1$;

R_1 — активное сопротивление первичной обмотки трансформатора;

R_2 — активное сопротивление вторичной обмотки трансформатора;

n — коэффициент трансформации.

Неточности, которые допускаются при таком расчете падения напряжения в трансформаторе получаются небольшими. В ряде случаев при электрическом расчете выпрямителей можно считать $\Delta U_{Tp} = 5 \div 15\%$ от выпрямленного напряжения U_0.

Учет падения напряжения в выпрямительных элементах схемы может быть сделан с помощью вольтамперных характеристик по заданной плотности тока элемента, температуре окружающей среды и другим заданным условиям работы элемента. Так, например, при плотности тока $\delta = 50$ *ма/см*² падение напряжения на каждом селеновом элементе равно 1,25 *в*. Если выпрямительное звено состоит из m последовательно соединенных элементов, то $\Delta U_в = 1{,}25 \cdot m$ *в*. В случае использования мостовых схем необходимо учесть также то обстоятельство, что выпрямленный ток протекает по двум плечам моста. В этом случае $\Delta U_в = 2 \cdot 1{,}25 \cdot m$.

Падение напряжения в сглаживающем фильтре определяется падением напряжения постоянного тока в обмотках сглаживающего дросселя (или фильтрующих сопротивлений).

При этом имеется в виду, что используются конденсаторы фильтра с очень большими сопротивлениями утечки, т. е. с малыми токами утечки.

Падение напряжения постоянного тока в обмотках дросселя сглаживающего фильтра будет:

$$\Delta U_{ф} = I_0 \cdot R_{Др},$$

где $R_{Др}$ — активное сопротивление обмоток дросселя.

При расчете можно считать, что падение напряжения на дросселе обычно составляет от 5% до 20% от выпрямленного напряжения U_0.

Если вместо дросселя используются фильтрующие сопротивления, как это имеет место в выпрямителях малой мощности, то вычисление падения напряжения в них производится согласно выражению

$$\Delta U_{ф} = I_0 \cdot R_{ф},$$

где $R_{ф}$ — фильтрующее сопротивление, причем $\Delta U_{ф} = (0,1 \div 0,3) \cdot U_0$.

РАСЧЕТ ВЫПРЯМИТЕЛЯ

Для расчета выпрямителя необходимо прежде всего задаться нужными значениями выпрямленного напряжения и тока (U_0 и I_0). Эти данные могут быть получены в результате расчета (или опытных данных) тех устройств, для питания которых предназначен выпрямитель (генератора, приемника, усилителя и т. п.). В ряде случаев могут быть также заданы некоторые дополнительные условия работы выпрямителя, связанные с особенностями эксплуатации питаемых устройств. К этим дополнительным условиям прежде всего относятся: заданный коэффициент пульсации выпрямленного напряжения, повышенное постоянство и возможность регулирования выпрямленного напряжения, заданные значения напряжения сети переменного тока и возможные пределы его изменения, пределы изменения температуры окружающей среды, длительность непрерывной работы выпрямителя и т. п. Наиболее общие требования, предъявляемые к выпрямителям при их использовании для питания ряда радиотехнических устройств, были приведены в табл. 1.

В результате произведенного расчета выпрямителя должны быть выбраны схемы выпрямителя и сглаживающего фильтра, определены типы выпрямительных элементов (селе-

новый или меднозакисный), их размеры и способ соединения (параллельное или последовательное), определены электрические данные силового трансформатора и элементов сглаживающего фильтра. Иногда одновременно должен быть решен ряд вопросов конструктивного характера. Как правило, конструктивный расчет элементов схемы выпрямителя и фильтра является последующей частью вычислений и нами не приводится. Конструктивный расчет силового трансформатора и сглаживающего фильтра может быть сделан на основании материалов специальной технической литературы.

Выбор типа выпрямительного элемента определяется условиями работы выпрямителя. В большинстве случаев предпочтение должно быть отдано селеновым элементам.

Можно рекомендовать следующий порядок расчета селенового выпрямителя.

1. Выбрать схемы выпрямления и сглаживающего фильтра.

Выбор схемы выпрямителя может быть сделан на основании сопоставления преимуществ и недостатков отдельных типов выпрямительных схем. При малых мощностях выпрямителей (меньше 1 *квт*), как правило, используют двухтактную схему выпрямления. Для получения высокого напряжения при малых токах нагрузки целесообразно применять схемы умножения напряжения. Если выпрямитель нагружается большими токами при низких напряжениях, то обычно используются мостовые схемы.

2. Выбрать выпрямительный элемент по заданному значению выпрямленного тока, т. е. определить необходимые размеры рабочей поверхности выпрямительного элемента.

Выбор размеров выпрямительного элемента из числа имеющихся промышленных образцов заключается в использовании данных табл. 4 (стр. 18), в которой указаны допустимые токи нагрузки (величины выпрямленного тока) для определенных (выбранных) схем выпрямления и заданном характере нагрузки. Так, например, для выпрямительного элемента диаметром 100 *мм* в случае мостовой схемы выпрямления и активной нагрузке допустим ток $I_0 = 3,4a$.

Если ток нагрузки I_0 превышает допустимый (указанный в табл. 4), то можно соединить несколько выпрямительных элементов параллельно. Число параллельно соединенных элементов может быть определено из соотношения

$$n = \frac{I_0}{I_0'},$$

где I_0 — постоянная составляющая выпрямленного тока в нагрузке;

I_0' — допустимый ток нагрузки для данного размера выпрямительного элемента по данным табл. 4.

Число параллельно соединенных выпрямительных элементов должно быть округлено до ближайшего целого.

При емкостной нагрузке уменьшают значение I_0', определенное по табл. 4 на 20 %.

Влияние температуры окружающей среды на допустимые плотности тока может быть учтено на основании данных табл. 5.

3. Выбрать число последовательно соединенных выпрямительных элементов так, чтобы обратное напряжение на один элемент $U_{обр}'$ не превышало допустимого.

Эта часть расчета может быть сделана в следующей последовательности:

а) По заданному значению выпрямленного напряжения и падению напряжения во всех элементах выпрямителя определяется напряжение холостого хода выпрямителя:

$$U_{0x.x} = U_0 + \Delta U_{Tp} + \Delta U_B + \Delta U_ф;$$

здесь ΔU_{Tp} — падение напряжения в обмотках трансформатора;

ΔU_B — падение напряжения в выпрямительных элементах;

$\Delta U_ф$ — падение напряжения в сглаживающем фильтре.

б) Из табл. 10 определяем для данной схемы выпрямления обратное напряжение, приложенное к столбику из последовательно соединенных выпрямительных элементов. При расчете реальных выпрямителей необходимо учитывать потери в трансформаторе, выпрямительных элементах и фильтре. Поэтому при пользовании табл. 10 следует вместо U_0 подставлять $U_{0x.x}$.

Число последовательно соединенных выпрямительных элементов можно определить из соотношения

$$m = \frac{U_{обр}}{U_{обр}'},$$

где $U_{обр}$ — обратное напряжение, приложенное к каждому столбику данной выпрямительной схемы (для мостовой схемы к каждому из четырех плеч моста);

$U'_{обр}$ — наибольшее допустимое обратное напряжение на один элемент, приведенное в табл. 4.

Для определения числа m нужно взятое из таблицы значение допустимого обратного напряжения умножить на 1,41, так как в табл. 4 указано эффективное значение обратного напряжения $U'_{обр}$.

4. Определить общее число выпрямительных элементов для всего выпрямителя. Это может быть найдено из выражения

$$N = m \cdot n \cdot k,$$

где m — число последовательно включенных выпрямительных элементов, образующих один столбик выпрямительной схемы;

n — число параллельно соединенных элементов;

k — число столбиков, в выпрямительной схеме (для мостовой схемы $k = 4$).

5. Определить электрические данные силового трансформатора. Это может быть сделано на основании табл. 10 и учета потерь в трансформаторе, фильтре и других элементах выпрямителя.

6. Произвести электрический расчет сглаживающего фильтра. Расчет фильтра может быть сделан различными способами. Некоторые из них приводятся ниже.

Для пояснения ниже приведен ряд конкретных примеров расчета выпрямителей для заданных значений U_0 и I_0. Рекомендуемая схема расчета выпрямителя может быть видоизменена в зависимости от специфических особенностей рассчитываемого выпрямителя.

ПРИМЕР РАСЧЕТА СЕЛЕНОВОГО ВЫПРЯМИТЕЛЯ ДЛЯ ПИТАНИЯ ЦЕПЕЙ НАКАЛА ЛАМП

Задано. Ток нагрузки $I_0 = 6$ *а*. Выпрямленное напряжение $U_0 = 6$ *в*. Пульсация напряжения несущественна, так как имеется в виду питание накала мощных ламп.

1. Выбираем мостовую схему выпрямления без сглаживающего фильтра.

2. Пользуясь табл. 4 (стр. 18), выбираем выпрямительный элемент диаметром 100 *мм*, с рабочей поверхностью 69 $см^2$.

Из данных табл. 4 видно, что необходимо параллельное включение нескольких элементов этого размера (один элемент может обеспечить в нормальном режиме $I_0 = 3{,}4$ *а*). Находим, сколько выпрямительных элементов нужно включить параллельно:

$$n = \frac{I_0}{I'_0} = \frac{6}{5} \approx 2.$$

3. Определяем число последовательно соединенных выпрямительных элементов.

а) Найдем напряжение холостого хода выпрямителя

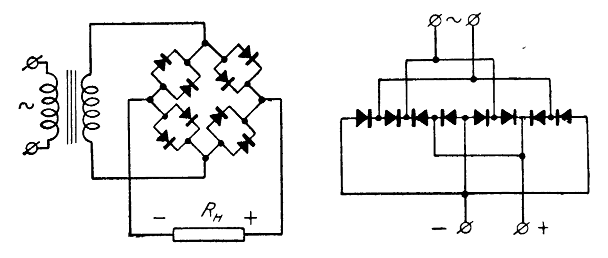
$$U_{0x.x} = U_0 + \Delta U_{Tp} + \Delta U_B =$$
$$= 6 + 0{,}9 + 2 \cdot m \cdot 1{,}25 = 6{,}9 + 2{,}5 \cdot m,$$

где ΔU_{Tp} — падение выпрямленного напряжения в обмотках трансформатора, причем принято $\Delta U_{Tp} = 0{,}15 \cdot U_0 = 0{,}15 \cdot 6 = 0{,}9$ *в*;

1,25 — падение выпрямленного напряжения на зажимах каждого выпрямительного элемента;

m — число последовательно включенных выпрямительных элементов, образующих выпрямительный столбик схемы;

2 — число столбиков, по которым протекает выпрямленный ток (в случае мостовой схемы выпрямленный ток протекает по двум последовательно включенным плечам).



Фиг. 22. Схемы селенового выпрямителя для питания цепей накала ламп.

б) Пользуясь табл. 10 находим:

$$U_{обр} = 1{,}57 \cdot U_{0x.x} = 1{,}57 \cdot (6{,}9 + 2{,}5 \cdot m) = 10{,}8 + 3{,}9 \cdot m.$$

в) По данным табл. 4 находим $U'_{обр} = 16$ *в*. В таком случае число последовательно включенных выпрямительных элементов будет:

$$m = \frac{U_{обр}}{1{,}41 \cdot U'_{обр}} = \frac{10{,}8 + 3{,}9 \cdot m}{22{,}6},$$

или $18{,}7 \cdot m = 10{,}8$, откуда получаем $m = 0{,}58$.

Разумеется, что меньше одного выпрямительного элемента последовательно включить нельзя. Выбираем $m = 1$. При этом напряжение холостого хода выпрямителя

$$U_{0x.x} = 6{,}9 + 2{,}5 \cdot 1 = 9{,}4 \text{ в}.$$

4. Общее число выпрямительных элементов

$$N = m \cdot n \cdot k = 1 \cdot 2 \cdot 4 = 8 \qquad \text{(для мостовой схемы } k = 4\text{)}.$$

Схема выпрямителя представлена на фиг. 22.

5. Определяем исходные (электрические) данные для расчета трансформатора. Для этого, пользуясь табл. 10, находим:

$$U_2 = 1,11 \cdot U_{0\ x.x} = 1,11 \cdot 9,4 = 10,4\ \text{в};$$

$$I_2 = 1,11 \cdot I_0 = 1,11 \cdot 6 = 6,66\ \text{а}.$$

ПРИМЕР РАСЧЕТА СЕЛЕНОВОГО ВЫПРЯМИТЕЛЯ ДЛЯ ПИТАНИЯ АНОДНОЙ ЦЕПИ ЛАМПОВОГО ГЕНЕРАТОРА МАЛОЙ МОЩНОСТИ

Задано. Ток нагрузки $I_0 = 0,2$ *а* $= 200$ *ма*. Выпрямленное напряжение $U_0 = 400$ *в*.

1. Выбираем схемы выпрямителя и сглаживающего фильтра.

Пользуясь табл. 1 (стр. 6), находим, что коэффициент пульсации выпрямленного напряжения для такого рода нагрузок выпрямителя не должен превышать 0,005 (0,5%).

Выбираем мостовую схему выпрямления с П-образным сглаживающим фильтром (с конденсатором на входе фильтра).

Применение в данном случае двухтактной схемы выпрямления с выведенной средней точкой обмотки трансформатора нецелесообразно вследствие неполного использования обмоток трансформатора, увеличения его размеров и веса. Из этих же соображений невыгодно использовать однотактную схему выпрямления, тем более, что при этой схеме необходим более сложный сглаживающий фильтр.

2. Выбираем выпрямительные элементы по току.

Пользуясь табл. 4 и учитывая емкостный характер нагрузки, определяем размеры и тип выпрямительного элемента по заданному значению тока нагрузки I_0. В данном случае (с учетом емкостного характера нагрузки) выпрямительный элемент должен быть рассчитан на допустимый ток

$$I_0' = \frac{I_0}{0,8} = \frac{0,2}{0,8} = 0,25\ \text{а}.$$

Указанный ток допустим для выпрямительного элемента диаметром 35 *мм*.

3. Определяем число последовательно соединенных выпрямительных элементов, включенных в одно плечо моста.

а) Напряжение холостого хода выпрямителя

$$U_{0x.x} = U_0 + \Delta U_{Tp} + \Delta U_B + \Delta U_ф =$$

$$= 400 + 0,1 \cdot 400 + 0,15 \cdot 400 + 2 \cdot m \cdot 1,25 = 500 + 2,5 \cdot m,$$

где $\Delta U_{Tp} = 0,1 \cdot U_0$;

$\Delta U_ф = 0,15 \cdot U_0$;

m — число последовательно соединенных выпрямительных элементов;

2 — число последовательно включенных плеч моста;

1,25 — множитель, представляющий собой значение падения напряжения на каждом выпрямительном элементе.

б) Обратное напряжение, приложенное к одному плечу моста при емкостной нагрузке

$$U_{обр} \approx 2 \cdot U_{0\ x.x} =$$
$$= 2 \cdot (500 + 2,5 \cdot m) = 1\,000 + 5 \cdot m.$$

в) По табл. 4 (стр. 18) находим допустимое обратное напряжение на каждый выпрямительный элемент ($U'_{обр} = 18$ *в*) и определяем число последовательно включенных элементов

$$m = \frac{U_{обр}}{1,41 \cdot U'_{обр}} = \frac{1\,000 + 5 \cdot m}{1,41 \cdot 18},$$

откуда находим $m = 50$.

При этом напряжение холостого хода выпрямителя

$$U_{0\ x.x} = 500 + 2,5 \cdot m = 500 + 2,5 \cdot 50 = 625 \text{ в}.$$

4. Общее число выпрямительных элементов

$$N = m \cdot n \cdot k = 50 \cdot 1 \cdot 4 = 200,$$

так как для мостовой схемы $k = 4$ (четыре плеча моста).

5. Определяем исходные (электрические) данные для расчета силового трансформатора

$$U_2 = \frac{1}{1,41} \cdot U_{0\ x.x} = 0,71 \cdot 625 = 442 \text{ в}.$$

Пользуясь табл. 9, находим:

$$I_2 = 1,7 \cdot I_0 = 1,7 \cdot 0,2 = 0,34 \text{ а}.$$

6. Электрический расчет фильтра рассматривается ниже.

ПРИМЕР РАСЧЕТА БЕСТРАНСФОРМАТОРНОГО ВЫПРЯМИТЕЛЯ МАЛОЙ МОЩНОСТИ С УДВОЕНИЕМ НАПРЯЖЕНИЯ

Задано. Ток нагрузки $I_0 = 10$ *ма*. Выпрямленное напряжение $U_0 = 220$ *в*.

Предполагается питание анодных цепей радиоприемника типа „Родина" и включение выпрямителя в сеть переменного тока с напряжением 110 *в*.

1. Выбираем схемы выпрямителя и сглаживающего фильтра. Как видно из табл. 1 (стр. 6), в данном случае необходимо обеспечить коэффициент пульсации выпрямленного напряжения $k_n \leqslant 0,1\%$. Выбираем двухтактную схему выпрямления с удвоением напряжения и с двумя звеньями сглаживающего фильтра (фиг. 23). При этом считаем целесообразным применение в фильтре активных сопротивлений вместо дросселей.

Выбор схемы удвоения обусловлен необходимостью получить выпрямленное напряжение, вдвое превышающее напряжение сети переменного тока. Рассчитываем на наименьшее напряжение сети в 110 *в*,

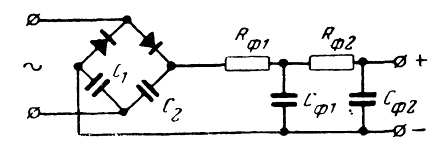
предполагая применить гасящие (последовательно включенные) сопротивления при более высоких напряжениях сети (127 или 220 *в*).

2. Выбираем выпрямительные элементы по току.

Как видно из табл. 4 (стр. 18), здесь можно применить выпрямительный элемент диаметром 18 *мм*.

Действительно, так как каждый из выпрямительных элементов работает в условиях, подобных однотактной схеме с емкостной нагрузкой, то учитывая увеличение эффективного значения тока в элементе при емкостной нагрузке, найдем:

$$I'_0 = I_0 \cdot 1,2 = 0,01 \cdot 1,2 = 0,012 \ a.$$



Фиг. 23. Схема выпрямителя с удвоением напряжения.

$R_{ф1}$ и $R_{ф2}$ — сопротивления фильтра: $C_{ф1}$ и $C_{ф2}$—конденсаторы фильтра.

Множитель 1,2 учитывает увеличение эффективного значения тока при емкостной нагрузке.

3. Определяем число последовательно соединенных выпрямительных элементов для одного столбика схемы.

К каждому столбику будет приложено обратное напряжение

$$U_{обр} = U_{макс} + U_c \approx 2 \cdot U_{макс} = 2 \cdot 1,41 \cdot U_c = 2 \cdot 1,41 \cdot 110 = 310 \ в.$$

При этом считаем, что каждый конденсатор зарядится до амплитудного значения напряжения сети ($U_{макс} = 1,41 \cdot U_c$).

Число последовательно включенных выпрямительных элементов

$$m = \frac{U_{обр}}{1,41 \cdot U'_{обр}} = \frac{310}{1,41 \cdot 18} = 12,$$

где $U'_{обр} = 18$ *в* взято из табл. 4.

Наибольшее напряжение на зажимах последовательно соединенных конденсаторов схемы C_1 и C_2 (фиг. 23), равное напряжению холостого хода выпрямителя, составляет $2 \cdot U_{макс} = 310$ *в*.

4. Определяем емкость конденсаторов C_1 и C_2. Суммарная емкость C может быть определена из соотношения

$$C = \frac{10^6}{m \cdot f \cdot R \cdot k_n} = \frac{10^6}{2 \cdot 50 \cdot 0,2 \cdot 28\,000} \approx 1,8 \ мкф.$$

В этом соотношении приняты следующие обозначения и величины:

$C = \frac{C_1 \cdot C_2}{C_1 + C_2}$ — суммарная емкость последовательно соединенных конденсаторов C_1 и C_2;

f — частота тока в сети, равная 50 *гц*;

m — число тактов выпрямления (в данном случае $m = 2$, так как взята двухтактная схема выпрямления);

$k_п$ — коэффициент пульсации выпрямленного напряжения на зажимах конденсаторов C_1 и C_2 или на входе сглаживающего фильтра (значением $k_п = 0{,}2$ мы задаемся);

$R = 28\,000$ *ом* мы задаемся (считая $R = R_в + R_ф$, где $R_н = \frac{U_0}{I_0} = \frac{220}{0{,}01} = 22\,000$ *ом*, а суммарное сопротивление сглаживающего фильтра $R_ф = \frac{\Delta U_ф}{I_0} = \frac{60}{0{,}01} = 6\,000$ *ом*).

Как видно из приведенного значения $R_ф$, мы приняли $\Delta U_ф = 60$ *в*. Основанием для выбора $\Delta U_ф = 60$ *в* служит следующее.

На зажимах конденсаторов будут наибольшее значение напряжения $U_{C\,макс} = 310$ *в* и наименьшее напряжение $U_{C\,мин} = U_{C\,макс} \times (1 - k_п) = 310 \cdot 0{,}8 = 250$ *в*. Среднее значение выпрямленного напряжения до сглаживающего фильтра будет:

$$U_{ср} = \frac{U_{C\,макс} + U_{C\,мин}}{2} = \frac{310 + 250}{2} = 280 \text{ в}.$$

С некоторыми допущениями можно считать, что среднее значение выпрямленного напряжения $U_{ср} = U_0 + \Delta U_ф$, откуда следует, что $\Delta U_ф = U_{ср} - U_0 = 280 - 220 = 60$ *в*.

Из соотношения $C = \frac{C_1 \cdot C_2}{C_1 + C_2} = 1{,}8$ *мкф* при $C_1 = C_2$, находим:

$$C_1 = C_2 = 3{,}6 \text{ мкф}.$$

Практически выбираем $C_1 = C_2 = 4$ *мкф*.

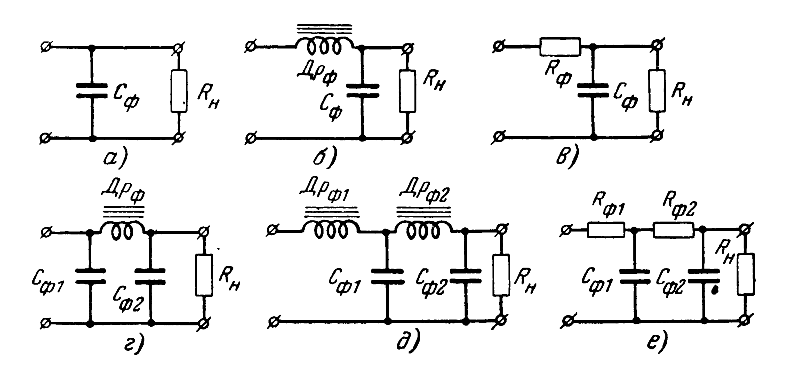
Приведенный пример расчета выпрямителя можно сделать иначе. Можно, например, задаться меньшим коэффициентом пульсации напряжения на входе фильтра, что дает возможность обойтись однозвенным фильтром. Однако такое решение задачи невыгодно, так как оно приводит к увеличению емкостей C_1 и C_2,

РАСЧЕТ СГЛАЖИВАЮЩЕГО ФИЛЬТРА

Выше указывалось назначение сглаживающих фильтров и приводились допустимые коэффициенты пульсации выпрямленного напряжения при питании различных радиотехнических устройств (табл. 1). В практике использования радиотехнических устройств находят применение фильтры, схемы которых приведены на фиг. 24.

Сглаживающее действие блокирующего конденсатора $C_ф$ в схеме фиг. 24,*а* может быть объяснено следующим образом. Переменная составляющая пульсирующего выпрям-

ленного тока проходит через параллельно включенные конденсатор $C_ф$ и сопротивление нагрузки $R_н$. Если емкость конденсатора $C_ф$ очень велика, то только небольшая часть переменной составляющей тока I_R будет протекать по сопротивлению нагрузки, а бóльшая его часть (I_C) пройдет



Фиг. 24. Схемы сглаживающих фильтров.

а — блокирующая емкость; *б* — однозвенный Г-образный; *в* — однозвенный Г-образный с фильтрующим сопротивлением; *г* — однозвенный П-образный, *д* — двухзвенный Г-образный; *е* — двухзвенный Г-образный с фильтрующими сопротивлениями. $C_ф$, $C_{ф1}$, $C_{ф2}$ — конденсаторы; $Др_ф$, $Др_{ф1}$, $Др_{ф2}$ — дроссели; $R_ф$, $R_{ф1}$, $R_{ф2}$ — активные сопротивления; $R_н$ — сопротивление нагрузки.

через конденсатор. Токи I_C и I_R связаны между собой соотношением

$$\frac{I_C}{I_R}=\frac{R_н}{R_C},$$

где $R_C=\frac{1}{2\cdot\pi\cdot f_n\cdot C}$ *ом* (f_n — частота пульсации и C — емкость конденсатора, *ф*).

Таким образом, действие блокирующего конденсатора зависит не только от емкости конденсатора $C_ф$, но и от величины сопротивления нагрузки $R_н$.

Коэффициент пульсации напряжения на нагрузке при использовании фильтра фиг. 24,*а* может быть получен в виде:

$$k_n=\frac{10^6}{f_c\cdot m\cdot C_ф\cdot R_н},$$

где $C_ф$ — емкость конденсатора, *мкф*;

m — число тактов выпрямления (при однотактном выпрямлении $m=1$, а при двухтактном $m=2$);

f_c — частота сети (частота пульсации $f_п = m \cdot f_c$).

Сглаживающий фильтр фиг. 24,*б* называется однозвенным Г-образным или сглаживающим фильтром с индуктивностью на входе. Такие фильтры применяют для того, чтобы одновременно со сглаживанием пульсаций не нарушать нормальной работы выпрямителя, созданием больших зарядных токов емкости и увеличением эффективного значения тока выпрямителя. Коэффициент сглаживания такого фильтра можно определить из выражения

$$q = \omega^2 \cdot L \cdot C_ф = \frac{k_{п1}}{k_п},$$

где $\omega = 2\pi f_п$, а $f_п$ — частота пульсации;

L — индуктивность дросселя $Др_ф$, *гн*;

$C_ф$ — емкость конденсатора, *ф*;

$k_{п1}$ — коэффициент пульсации на входе фильтра;

$k_п$ — коэффициент пульсации на выходе фильтра.

Индуктивность дросселя и емкость конденсатора нельзя выбирать произвольно. Может оказаться, что фильтр будет не только ослаблять пульсации напряжения, но и усиливать их, если $Др_ф$ и $C_ф$ создадут колебательный контур с собственной частотой

$$\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{L \cdot C_ф}} = 2 \cdot \pi \cdot f_c \cdot m = \omega_c \cdot m.$$

Чтобы избежать резонансных явлений в сглаживающем фильтре, его элементы выбирают так, чтобы $2\omega_0 \ll \omega_c \cdot m$.

Если сглаживающий фильтр работает в цепи с малым током нагрузки I_0, то вместо дросселей низкой частоты выгоднее использовать активные сопротивления $R_ф$ (фиг. 24,*в*). При этом заметно уменьшаются вес и размеры фильтра. Коэффициент сглаживания такого фильтра можно найти из соотношения

$$q = \frac{k_{п1} \cdot U_{0ф}}{k_п \cdot U_0} = m \cdot \omega_c \cdot R_ф \cdot C_ф,$$

где

$U_{0ф}$ — постоянная составляющая напряжения на входе фильтра, причем $U_{0ф} = U_0 + \Delta U_ф = U_0 + R_ф \cdot I_0$.

Двухзвенные фильтры можно рассматривать, как два последовательно соединенных фильтра более простого вида. Так, например, фильтр фиг. 24,*е* представляет собой два последовательно включенных фильтра фиг. 24,*в*, а фильтр фиг. 24,*д* — два последовательно включенных фильтра фиг. 24,*б*.

Фильтр фиг. 24,*г* может рассматриваться как последовательное соединение фильтров фиг. 24,*а* и *б*. Расчет такого фильтра производится в простейшем случае по формулам для фильтров фиг. 24,*а* и *б*. Однако точный расчет фильтра фиг. 24,*г*, включенного на выходе выпрямителя, значительно сложнее. Он должен быть рассчитан совместно с выпрямителем, так как выбор емкости $C_{ф1}$ весьма сильно сказывается на работе выпрямителя. Существует целый ряд методов расчета таких фильтров. Остановимся на одном из них.

ПРИМЕР РАСЧЕТА СГЛАЖИВАЮЩЕГО ФИЛЬТРА

Расчет может быть проведен в следующем порядке:

1. Определяем вспомогательную величину

$$A = \frac{\pi \cdot I_0 \cdot r}{m \cdot U_0},$$

где m — число тактов выпрямления;

r — суммарное сопротивление выпрямительного элемента и обмотки трансформатора.

Имея в виду пояснение всего расчета конкретным примером, приведем попутное вычисление элементов сглаживающего фильтра к выпрямителю, расчет которого приведен на стр. 51. Для данного расчета выбираем $r = 200$ *ом* и $m = 2$ (двухтактное выпрямление). В таком случае

$$A = \frac{3{,}14 \cdot 0{,}2 \cdot 200}{2 \cdot 400} = 0{,}157.$$

2. Пользуясь графиком фиг. 25 для $A = 0{,}157$, находим коэффициент $H = 300$. По величине H можно определить емкость конденсатора $C_{ф1}$, если задаться коэффициентом пульсации напряжения, который желательно получить на зажимах этого конденсатора. Величину емкости конденсатора определяем из соотношения

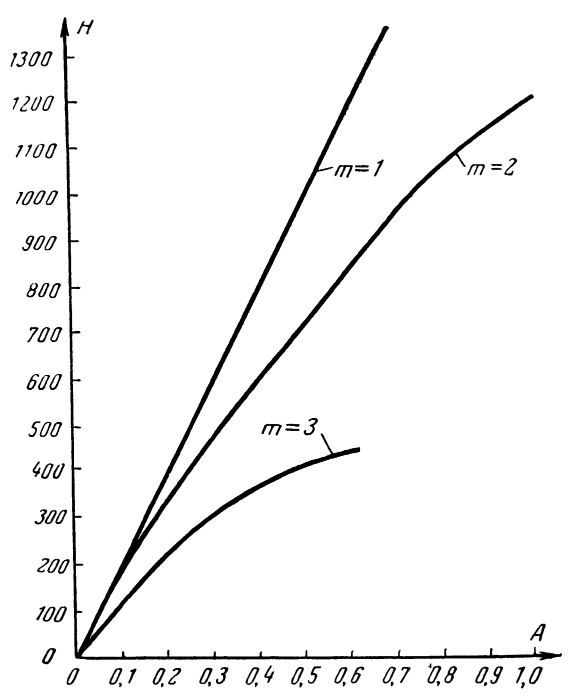
$$C_{ф1} = \frac{H}{k_{п1} \cdot r} = \frac{300}{0{,}15 \cdot 200} = 10 \text{ мкф}$$

(при коэффициенте пульсации на зажимах конденсатора $C_{ф1}$, равном $k_{п1} = 0{,}15$).

3. Определяем коэффициент сглаживания Г-образного фильтра составленного из дросселя $Др_{ф}$ и второго конденсатора $C_{ф2}$. Эта часть фильтра включена после конденсатора $C_{ф1}$. Коэффициент сглаживания Г-образного фильтра можно определить по выражению

$$q = \frac{k_{п1}}{k_{п}},$$

где $k_{п1}$ — коэффициент пульсации на зажимах конденсатора $C_{ф1}$;
$k_{п}$ — коэффициент пульсации на выходе фильтра (на нагрузке).



Фиг. 25. Кривая зависимости коэффициента H от вспомогательной величины A для разных схем выпрямления.

Для фильтра к выпрямителю, расчет которого мы приводим, имеем: $k_{п1} = 0{,}15$; $k_{п} = 0{,}001$. В этом случае

$$q = \frac{0{,}15}{0{,}001} = 150.$$

4. Определяем произведение $L_{ф} \cdot C_{ф2}$ по рассчитанному выше коэффициенту сглаживания из соотношения

$$L_{ф} \cdot C_{ф2} = \frac{10 \cdot q}{m^2},$$

где $L_{ф}$ — индуктивность дросселя, *гн*;

$C_{ф2}$ — емкость конденсатора, *мкф*.

Для конкретных данных рассчитываемого фильтра имеем:

$$L_{ф} \cdot C_{ф2} = \frac{10 \cdot 150}{4} = 375.$$

5. Задаемся емкостью второго конденсатора $C_{ф2}$ и определяем индуктивность дросселя $Др_{ф}$. Обычно для удобства принимают $C_{ф1} = C_{ф2}$. Для рассчитываемого фильтра задаемся $C_{ф2} = 10$ *мкф* и получаем значение индуктивности дросселя

$$L_{ф} = \frac{375}{10} = 37{,}5 \text{ гн}.$$

Конденсаторы фильтра выбираются с большим рабочим напряжением. Если выпрямленное напряжение $U_0 = 400$ *в*, то конденсаторы должны быть рассчитаны на рабочее напряжение $U_{раб} = 600 \div 800$ *в*.

6. Сопротивление обмотки дросселя постоянному току определяем из соотношения

$$R_{ф} = \frac{\Delta U_{ф}}{I_0} = \frac{60}{0{,}2} = 300 \text{ ом}.$$

7. Проверяем неравенство $2\omega_0 \ll m \cdot \omega_c$.

Для рассчитываемого фильтра имеем:

$$2 \cdot \omega_0 = \frac{2}{\sqrt{L_{ф} \cdot C_{ф}}} = \frac{2}{\sqrt{37{,}5 \cdot 5 \cdot 10^{-6}}} \approx 146,$$

где $C_{ф} = \frac{C_{ф1} \cdot C_{ф2}}{C_{ф1} + C_{ф2}} = 5$ *мкф*;

$$m \cdot \omega_c = 2 \cdot 2 \cdot 3{,}14 \cdot 50 = 628.$$

Таким образом, заданное неравенство выдерживается.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В настоящее время применение полупроводниковых выпрямителей в радиотехнике не ограничивается лишь областью электрического питания. То обстоятельство, что такие выпрямители хорошо проводят ток только в одном направлении, позволяет использовать их в самых разнообразных областях радиотехники, заменяя двухэлектродные электронные лампы. Подобная замена ламп стала возможной в связи с применением многочисленных типов полупроводниковых выпрямителей, к которым относятся также и кристаллические детекторы. В последние годы начали успешно приме-

няться полупроводниковые триоды, которые в ряде случаев заменяют трехэлектродные лампы.

Как было показано выше, использование селеновых и меднозакисных выпрямительных элементов для преобразования переменного тока в постоянный связано со сравнительно большими рабочими поверхностями (большими токами) элемента и низкой частотой выпрямляемого тока (50 *гц*). В этих условиях можно пренебрегать влиянием емкости, образованной электродами элемента, а главное внимание обращать на к. п. д. При использовании же полупроводниковых выпрямителей в радиотехнических схемах для детектирования, преобразования частоты, модуляции и т. п., как правило, приходится иметь дело с весьма малыми токами высокой частоты. Поэтому здесь приходится считаться с емкостью элемента, а также с рядом особенностей его характеристики в отношении прямого и обратного токов, не обращая большого внимания на к. п. д.

Величина собственной емкости выпрямительного элемента в первом приближении определяется площадью (рабочей поверхностью) электродов, которые образуют плоский конденсатор. При работе такого элемента в цепях высокой частоты наличие собственной емкости даже при очень малой поверхности электродов может привести к значительному снижению выпрямительного действия элемента. Этим объясняется то обстоятельство, что современные селеновые и меднозакисные выпрямительные элементы применяются преимущественно в цепях тока с частотой до 20 000 *гц*. При более высоких частотах находят применение кристаллические детекторы, которые обладают значительно меньшими собственными емкостями и большими сопротивлениями запорного слоя.

ВЫБОР СЕРДЕЧНИКА ДЛЯ СИЛОВОГО ТРАНСФОРМАТОРА

Зависимость габаритной мощности трансформатора от схемы выпрямителя

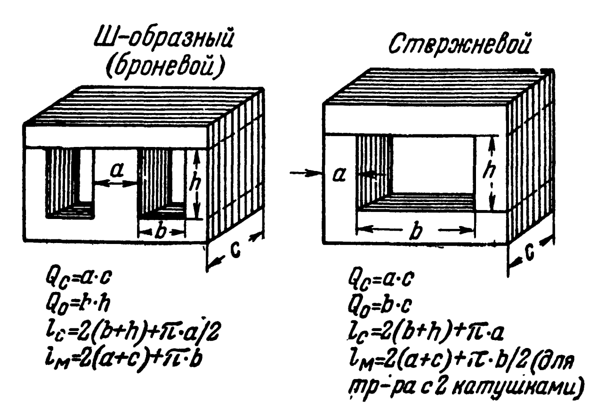
Схема выпрямителя	Габаритная мощность трансформатора $P_{габ} = \frac{U_1I_1+U_2I_2}{2}$, *ва*		
	при активной нагрузке	при индуктивной нагрузке	при емкостной нагрузке
Однотактная	$3,1U_0I_0$	—	$2,2U_0I_0$
Двухтактная (со средней точкой)	$1,48U_0I_0$	$1,34U_0I_0$	$2U_0I_0$
Двухтактная мостиковая . .	$1,23U_0I_0$	$1,11U_0I_0$	$1,6U_0I_0$
Схема удвоения	—	—	$1,6U_0I_0$

Сердечник выбирается по формуле

$$Q_cQ_o=1,6P_{габ},$$

где Q_c — сечение стали сердечника, *см*²;
Q_o — площадь окна сердечника, *см*².

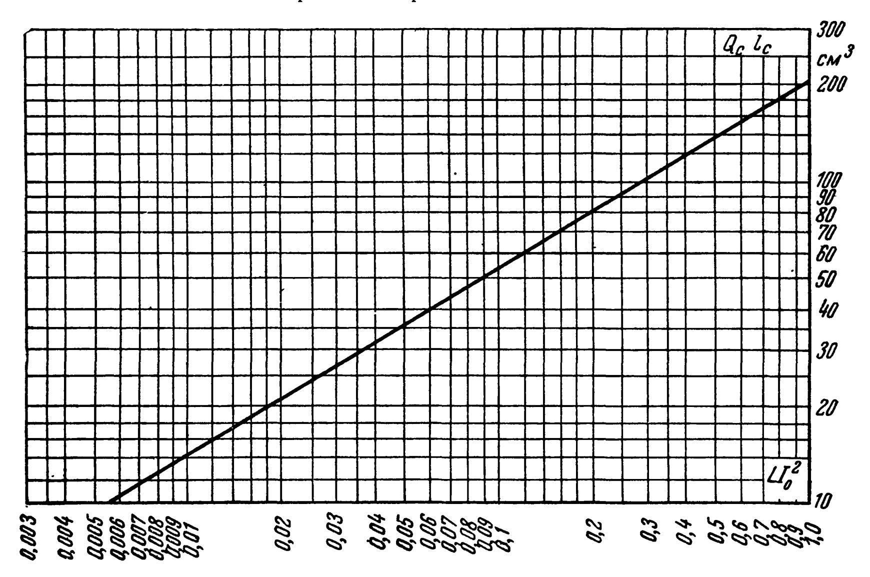
Формула дает правильные результаты для трансформаторов с обмотками из провода марки ПЭ или ПЭЛ. Для провода марки ПЭШО вместо коэффициента 1,6 следует подставить 2,1.



Отношение толщины пакета *c* к ширине стержня *a* должно лежать в пределах от 1 до 2.

ВЫБОР СЕРДЕЧНИКА ДЛЯ ДРОССЕЛЯ ФИЛЬТРА (СТАЛЬ МАРКИ ЭЧА ИЛИ ЭЧАА)

Для определения габаритов сердечника дросселя фильтра можно воспользоваться следующим графиком, построенным на основании практических данных для провода марки ПЭ или ПЭЛ.



Изоляционные прокладки, образующие воздушный зазор в сердечнике, должны иметь толщину $\frac{l_z}{2}$.

По горизонтальной оси графика отложена заданная при расчете величина LI^2_0 (L — индуктивность дросселя, *гн*; I_0 — постоянный ток через дроссель, *а*), а по вертикальной оси отложено искомое произведение $Q_c l_c$ (Q_c — сечение стали сердечника, $см^2$; l_c — средняя длина магнитной силовой линии, *см*).

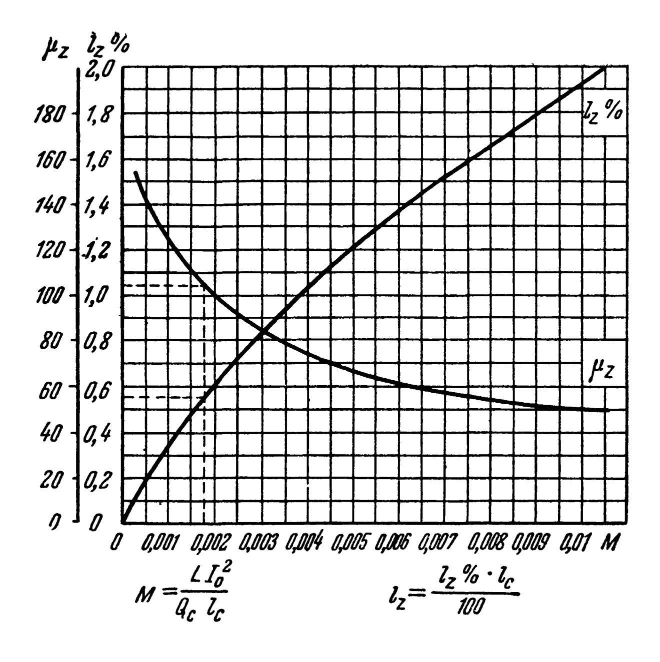
Определив произведение $Q_c l_c$, нужно выбрать стандартную пластину сердечника, найти l_c и вычислить необходимую величину сечения сердечника Q_c.

Отношение толщины пакета *c* к ширине стержня *a* должно лежать в пределах от 1 до 2.

Число витков дросселя определяется по формуле

$$W = 10^4 \sqrt{\frac{Ll_c}{1{,}26\mu_z Q_c}}$$

Магнитная проницаемость μ_z и необходимая длина воздушного зазора сердечника в % от l_c определяется по кривым следующего графика.



μ_z
l_z %
2,0
180
1,8
160
1,6
140
1,4
120
1,2
100
1,0
80
0,8
60
0,6
40
0,4
20
0,2
0
0
0
0,001
0,002
0,003
0,004
0,005
0,006
0,007
0,008
0,009
0,01
M
l_z %
μ_z
$M = \frac{L I_0^2}{Q_c\ l_c}$
$l_z = \frac{l_z \% \cdot l_c}{100}$

СОДЕРЖАНИЕ

Цена 80 коп.